



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TEMA:

**OPTIMIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS**

AUTOR: MURILLO VALLE JEFFERSON ROLANDO

DIRECTOR: ING. LEANDRO LEONARDO LORENTE LEYVA MSc.

IBARRA – ECUADOR

2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172236043-3		
APELLIDOS Y NOMBRES:	MURILLO VALLE JEFFERSON ROLANDO		
DIRECCIÓN:	LUIS ALFONSO MORENO Y GRABRIELA MISTRAL		
EMAIL:	jrmurillo@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2 383 756	TELÉFONO MÓVIL:	0991675596
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	OPTIMIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS		
AUTOR (ES):	MURILLO VALLE JEFFERSON ROLANDO		
FECHA: AAAAMMDD	2019/02/28		
SÓLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO INDUSTRIAL		
ASESOR /DIRECTOR:	ING. LEANDRO LORENTE MSC.		



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.

CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de Marzo del 2019

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Jefferson Rolando Murillo Valle



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.**

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE
LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.**

Yo, Jefferson Rolando Murillo Valle, con cédula de identidad Nro. 172236043-3, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: OPTIMIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Industrial en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 19 días del mes de Marzo del 2019

(Firma).....
Nombre: Jefferson Rolando Murillo Valle
Cédula: 172236043-3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

CERTIFICACIÓN

Ing. Leandro Lorente MSc., director de la Tesis de Grado desarrollada por el señor estudiante Jefferson Rolando Murillo Valle.

CERTIFICA

Que, el Proyecto de Tesis de grado titulado “OPTIMIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS”, ha sido realizado en su totalidad por el señor estudiante Jefferson Rolando Murillo Valle bajo mi dirección, para la obtención del título de Ingeniero Industrial. Luego de ser revisada, considerando que se encuentra concluido y cumple con las exigencias y requisitos académicos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Industrial, autoriza su presentación y defensa para que pueda ser juzgado por el tribunal correspondiente.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

Ing. Leandro Leonardo Lorente Leyva MSc.
DIRECTOR DE TESIS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación lo dedico:

A Dios por darme la sabiduría necesaria para poder culminar mis estudios de una manera satisfactoria, por darme la fortaleza de salir adelante y de no decaer ante las adversidades que se presentaron a lo largo de mi vida como estudiante universitario.

A mis padres por apoyarme moralmente y económicamente, ya que hicieron un gran esfuerzo para darme lo necesario y así poder lograr conseguir una meta más planteada en mi vida, ya que ellos me regalaron la mejor herencia que los padres pueden dejar a sus hijos/as que es la educación, les agradezco por motivarme y alentarme cuando estaba a punto de rendirme y dejarlo todo y gracias a esos ánimos y alientos pude seguir adelante y lograr este gran objetivo de ser un profesional.

A mi familia por haber estado pendientes de mí en toda mi trayectoria universitaria, ya que con el apoyo de cada uno de ellos y la fe que depositaron en mi persona era una razón más para esforzarme y darlo todo, para no defraudarlos y cumplir sus anhelos de verme convertido en un profesional que servirá a su patria.

A mi novia por ser la persona quien estuvo en los momentos más difíciles de mi vida como estudiante, ya que ella fue quien me animaba a darlo todo, es quien ha estado pendiente de mí y la que siempre confió en que lograría alcanzar esta gran meta.



JEFFERSON ROLANDO MURILLO VALLE

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

AGRADECIMIENTO

Agradezco:

A la Universidad Técnica del Norte por abrirme las puertas de ésta prestigiosa institución, dejándome formar parte de esta noble institución, para poder formarme como un profesional, brindándome sus instalaciones necesarias, para adquirir los conocimientos que un estudiante debe poseer para desenvolverse de una mejor manera en el ámbito profesional.

A la carrera de Ingeniería Industrial, por permitirme ingresar en el mundo del saber de las industrias, y así lograr obtener proyecciones de vida laboral más satisfactorias.

A los docentes que forman parte de la carrera de Ingeniería Industrial, por transmitirme sus conocimientos para de esta manera tener fundamentos e ideas innovadoras y sustentables para así poder generar productos y servicios de buena calidad y de gran prestigio.

Al Ing. Leandro Lorente MSc. Por ser mi director de trabajo de grado, quien me guio de una manera extraordinaria a lo largo del periodo de realización de mi tesis, él fue quien supo presionarme y exigirme de una manera adecuada para así explotar todas mis destrezas y habilidades y así obtener resultados favorables.

ÍNDICE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	ii
CONSTANCIAS.....	iii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	iv
CERTIFICACIÓN	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE	viii
ÍNDICE TABLAS	xi
ÍNDICE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	16
1. GENERALIDADES	16
1.1. Introducción	16
1.3. Justificación.....	18
1.4. Objetivos	19
1.4.1 Objetivo General.....	19
1.4.2 Objetivos Específicos	19
1.5. Alcance.....	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	21
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Planificación agregada	21
2.1.1 Estrategia de seguimiento o casa	22

2.1.2 Estrategia de planificación nivelada o estable	22
2.1.3 Métodos de Planificación Agregada.....	22
2.2. Pronósticos	23
2.3. Modelos de Pronósticos	24
2.3.1 Promedio Móvil Simple.....	24
2.3.2 Promedio Móvil Ponderado.....	25
2.3.3 Suavización Exponencial.....	26
2.4. Errores de Pronóstico	28
2.4.1 Desviación Absoluta Media (MAD).....	28
2.4.2 Error Medio Cuadrático (MSE).....	29
2.4.3 Porcentaje del Error Medio Absoluto (MAPE)	29
2.4.4 Porcentaje Medio de Error (MPE).....	29
2.5. Análisis de Regresión Lineal.....	30
2.6 Inventarios	30
2.6.1 Inventarios de Materia Prima	31
2.6.2 Inventarios de Productos en Proceso	31
2.6.3 Inventario de Productos Terminados	31
2.6.4 Modelo básico de la cantidad económica de pedido (EOQ)	31
2.7. Plan Maestro de Producción (MPS)	33
2.8. Programación de la Producción	34
2.8.1 Programación hacia adelante (forward).....	34
2.8.2. Programación hacia atrás (backward).....	34
2.9. Proceso de ejecución de un MPS factible	35
2.10. Dimensiones del Plan Maestro de Producción.....	35
2.10.1 Fuentes de la demanda.....	35
2.10.2 Capacidad de Producción	35
2.10.3 Lista de Materiales.....	36

2.10.4 Horizonte del MPS	36
2.11 Metaheurísticas.....	37
2.11.1 Algoritmo Genético	38
2.11.2 Búsqueda Tabú (Tabú Search)	41
2.11.3 Recocido Simulado (Simulated Annealing)	43
2.11.4 Búsqueda Scatter	45
2.11.5 Colonias de hormigas	46
2.11.6 Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP)	47
CAPÍTULO III. DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO.....	49
3. DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO	49
3.1 Modelo Matemático	49
3.2 Función Objetivo y Resricciones	50
3.3 Las variables de decisión.....	53
3.4 Sistematización de las variables de Decisión	54
3.5 Optimización del Plan Maestro de Producción (MPS) con Algoritmo Genético (AG). 71	
3.5.1 Pronóstico de la Demanda.....	77
3.6 Resultados del Plan Maestro de Producción (MPS) Optimizado.....	78
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	81
4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	82
4.1 Comparación entre MPS's	82
4.2 Aspectos Mejorados	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXOS	96

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Ponderaciones para los periodos.....	26
Tabla 2: Tiempo disponible en cada período p (TH_p)	55
Tabla 3: Inventario inicial disponible.	55
Tabla 4: Los recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período.....	55
Tabla 5: Tamaño de lote estándar para el producto k.....	57
Tabla 6: Las necesidades netas del producto k en el período p, considerando la capacidad infinita.	57
Tabla 7: Inventario de seguridad para el producto k en el período p.....	58
Tabla 8: La tasa de producción del producto k en el recurso r	58
Tabla 9: Capacidad disponible, en el recurso r en el período p.	59
Tabla 10: La cantidad de tamaños de lote estándar necesarios para la producción del producto k en el recurso r, en el período p.....	59
Tabla 11: Cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r, en el período p.....	61
Tabla 12: Cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r, en el período p.....	63
Tabla 13: Nivel de inventario inicial del producto k en el período p.	64
Tabla 14: Capacidad utilizada del recurso r en el período p.....	65
Tabla 15: Tasa porcentual obtenida a partir de la relación del número de horas consumidas del recurso r en el período p, y el número disponible de horas al mismo recurso y período...66	
Tabla 16: Recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período p.....	66
Tabla 17: Total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p.....	67
Tabla 18: Total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p, en el recurso r.	68
Tabla 19: Requisitos no cumplidos para el producto k en el período p.....	69

Tabla 20: Nivel medio de inventario generado para el producto k en el período p.....	70
Tabla 21: <i>Pronostico de la demanda 2018</i>	77
Tabla 22: Plan Maestro de Producción Optimizado Mediante Algoritmo Genético	78
Tabla 23: Plan Maestro de Producción (MPS) Optimizado.	79
Tabla 24: Plan Maestro de Producción Actual	82
Tabla 25: Plan Maestro de Producción Optimizado Mediante Algoritmo Genético	82
Tabla 26: Distribución de producción semanal actual.....	83
Tabla 27: Distribución de producción semanal estandarizado con Algoritmo Genético de Uniformes Sublimados.....	83
Tabla 28: Distribución de producción semanal actual de Camisetas Sport.....	84
Tabla 29: Distribución de producción semanal estandarizado de Camisetas Sport	85
Tabla 30: Distribución de producción semanal actual de Camisetas Sublimadas.....	86
Tabla 31: Distribución de producción semanal estandarizado de Camisetas Sublimadas	87
Tabla 32: Distribución de producción semanal actual de Camisetas Tipo Polo.....	88
Tabla 33: Distribución de producción semanal estandarizado de Camisetas Tipo Polo	88
Tabla 34: Requisitos no cumplidos para el producto k en el periodo p, después de la Optimización.....	90

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Proceso de planificación	21
Figura 2: Analogía del inventario como un tanque de agua.	31
Figura 3: Utilización del inventario a lo largo del tiempo.....	32
Figura 4: Esquema de lista de materiales.	36
Figura 5: Clasificación de las metaheurísticas.	38
Figura 6: Mayor acumulación de feromonas en el camino más corto.....	46
Figura 7: Operación de Cruce.....	74
Figura 8: Flujograma del Algoritmo Genético aplicado al MPS.....	75
Figura 9: Demanda y pronóstico de la demanda	78
Figura 10: Comparación de la distribución de producción semanal de Uniformes Sublimados entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.	84
Figura 11: Comparación de la distribución de producción semanal de Camisetas Sport entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.	86
Figura 12: Comparación de la distribución de producción semanal de Camisetas Sublimadas entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.	87
Figura 13: Comparación de la distribución de producción semanal de Camisetas Tipo Polo entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.	89
Figura 14: Requisitos no Cumplidos para el producto k en el periodo p.	89

RESUMEN

En un entorno de competencia global, el éxito de una empresa está directamente relacionado con el nivel de optimización de sus procesos en general, pero, en particular, a cómo planea y ejecuta la producción. En este contexto, el plan maestro de producción (MPS) es la actividad clave para el éxito. En este trabajo se aborda de forma general, todo lo relacionado con el MPS y la aplicación de métodos para la optimización de este; y como en la mayoría de las industrias. La creación de un plan maestro considera el conflicto de objetivos, tales como la maximización de los niveles de servicio, eficiente uso de recursos y minimización de niveles de inventario. Lamentablemente, la complejidad y el esfuerzo exigido para la creación de un plan maestro crece rápidamente con el aumento de la producción, principalmente cuando los recursos son limitados. Debido a tal complejidad, la aplicación de las técnicas Metaheurísticas demuestra su mejor desempeño, ante empresas que usualmente emplean heurística simple que proporcionan un plan rápido, pero pueden comprometer la eficiencia y los costos. A partir de esto, se proponen nuevas ideas para mejorar la planificación de la producción, con el uso de inteligencia artificial. El algoritmo Genético es una de las Técnicas Metaheurísticas más eficiente para la optimización del MPS por lo cual se lo utilizó para la optimización del caso de estudio obteniendo resultados favorables.

ABSTRACT

In an environment of global competition, a company's success is directly related to the level of optimization of its processes in general, but, in particular, to how it plans and executes production. In this context, the master production schedule (MPS) is the key activity for success. As in most industries, the creation of an MPS considers the conflicting objectives, such as maximization of service levels, efficient use of resources and minimization of inventory levels. Unfortunately, the complexity and effort required to create a master plan grows rapidly with increasing production, especially when resources are limited. Due to such complexity, the application of Metaheuristic techniques demonstrate their best performance, before companies that usually employ simple heuristics that provide a quick plan, but can compromise efficiency and costs. From this, new ideas are proposed to improve production planning, with the use of artificial intelligence. The Genetic algorithm is one of the best Metaheuristic Techniques for the optimization of the MPS for which it was used for the optimization of the case study obtaining favorable results.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

El proceso del planeamiento y programación de la producción se constituye de tres niveles importantes que ayudan al buen desarrollo del planeamiento y programación, según (Heizer & Render, 2016) a estos tres niveles se los denomina: Planeamiento Estratégico el cual es a largo plazo, Planeamiento Táctico se lo desarrolla a mediano plazo y programación de Producción o Planeamiento Operativo se lo efectúa en días.

Las Técnicas Metaheurísticas es uno de los métodos más efectivos para resolver este tipo de problemas de optimización del MPS, las técnicas metaheurísticas más utilizadas son: Algoritmos Genéticos, Búsqueda Tabú, Recocido Simulado, Búsqueda Scatter, Colonias de Hormigas, Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP).

Estos procedimientos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la mecánica estadística (Osman & Kelly, 1996).

Estas técnicas obtienen soluciones que cumplen con la calidad requerida y los resultados esperados, además permiten estudiar clases genéricas de problemas en lugar de instancias de problemas particulares. En general, las técnicas que obtienen mejores resultados (en precisión y esfuerzo) al resolver problemas complejos y del mundo real usan metaheurísticas. Sus campos de aplicación van desde la optimización combinatoria, bioinformática, telecomunicaciones a la economía, ingeniería de software, etc., que necesitan soluciones rápidas con alta calidad (Alba, Luque, & Nesmachnow, 2013).

Básicamente los algoritmos genéticos establecen una relación entre las posibles soluciones de un problema y los individuos de una población natural codificando la información de cada solución en un vector binario al cual anteriormente llamamos cromosoma, para ello es necesario incluir algún mecanismo de selección de modo que los cromosomas con mayor “fitness” se reproduzcan más frecuentemente que otros (Herrera, 2015).

El algoritmo genético obtiene resultados buenos a un costo de tiempo computacional aceptable, los cuales mejoran los resultados obtenidos inicialmente con los métodos exactos.

1.2. Problema

El Plan Maestro de Producción nació en la década de los 60 en Estados Unidos, como un paquete informático capaz de dar respuesta a una planeación de necesidades de materiales. Es ahí en donde se le otorga el nombre en inglés Master Production Schedule (MPS) o en español que significa Plan Maestro de Producción.

En la Provincia de Imbabura la mayoría de las empresas son manufactureras, por lo que han decidido implementar el MPS para tener un mejor desenvolvimiento en el área de producción, pero surgen cada vez nuevos inconvenientes que afectan la planificación de la producción, por lo que es necesario analizar detenidamente el MPS y determinar los problemas más relevantes para llevar a cabo la optimización de este.

Debido que este trabaja con tamaño de lotes, tiempos de entrega, inventarios de seguridad previamente establecidos sin proporcionar ayuda para estas configuraciones, el MPS no genera planes alternativos frente a planes no viables. Además, no toma en cuenta la disponibilidad de los materiales en los centros de trabajo, tiempos de suministros en función del lote de producción y existe un exceso de trabajadores realizando una misma tarea.

Existen diversas empresas en la Provincia de Imbabura que cuentan con un MPS, usan el inventario inicial y el pronóstico de ventas para un producto en particular, un especialista de

producción puede calcular la cantidad de producción necesaria por periodo para conocer la demanda anticipada de los clientes. Este cálculo se vuelve más complejo cuando se trata de un multiproducto, donde los errores de pronóstico y las restricciones de capacidad pueden generar mayor incertidumbre al proceso de planeación.

Pero estas empresas aún no cuentan con un MPS optimizado, lo cual hace que atraviesen grandes problemas de rentabilidad y se generen falencias en sus procesos, debido a que el plan actual no es estable y eficiente.

1.3. Justificación

El MPS es un plan de producción a corto y mediano plazo, el cual indica las cantidades a producir y en los plazos de entrega determinados para cada producto, tomando en cuenta la capacidad de la empresa.

Ayuda a determinar cuánto producir y cuando se lo debe hacer, para de esta manera cumplir con la demanda requerida por los clientes en el tiempo establecido, además es de gran ayuda al momento de tomar decisiones operativas acerca de la planificación del siguiente período. El MPS evita sobrecargas de modo que la capacidad de producción se utilice de una forma más eficiente y el costo de producción sea más bajo.

La importancia de Optimizar el MPS es darle una mayor estabilidad al plan, además de reducir el costo de inventarios para así mejorar la planificación de los productos, responder efectivamente a cambios en el mercado y lograr que las empresas sean más rentables. Es además importante optimizar el sistema de aprovisionamiento ya que permite conocer las cantidades y los periodos de adquisición de la materia prima para así satisfacer las necesidades del MPS.

Las técnicas Metaheurísticas tienen como objetivo principal la solución de los problemas de optimización combinatoria, es por eso que se han elegido este método para la solución a

los problemas de optimización combinatoria que puedan existir, debido a que estas actúan de una manera eficiente debido a que trabajan con gran cantidad de variables, una vez aplicada las técnicas y obtenido los resultados deseados se procederá a realizar una comparación de resultados entre el MPS actual de las empresas y el MPS optimizado, determinando así las ventajas y beneficios obtenidos a través de la optimización del plan y su eficacia y eficiencia.

La Optimización del MPS mejora los procesos para que se generen las menores pérdidas económicas posibles, y así la rentabilidad de una empresa sea favorable. Mediante estas soluciones se podrá contribuir a que la provincia de Imbabura mejore su índice de competitividad provincial, para así poder ascender de puesto, ya que actualmente se encuentra en la categoría media, en el puesto número 7 con un índice de 43,5. Mientras que en el índice de desempeño económico se encuentra en la categoría media y el puesto número 9 con un índice de 33,9 (Productividad, 2018).

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo para optimizar el Plan Maestro de Producción que conduzca al mejoramiento de la planificación de la producción aplicando técnicas metaheurísticas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisión del estado del arte de los modelos empleados para la elaboración de un plan maestro de producción y de las funciones metaheurísticas que se emplean para optimizar el plan maestro de producción.
- Desarrollar las técnicas metaheurísticas para la optimización del plan maestro de producción en empresas de la provincia de Imbabura.
- Realizar un análisis comparativo de los cambios que se producirán en las empresas del territorio con la optimización del plan maestro de producción.

1.5. Alcance

El estudio se realizará mediante la generación de un modelo para optimizar el MPS con la aplicación de técnicas metaheurísticas, para esto se tomarán como estudio de caso, los datos históricos de las empresas de Imbabura, las cuales actualmente ya cuentan con un Plan Maestro de Producción. Este estudio busca una mayor estabilidad del MPS, generar alternativas ante planes no viables y que las empresas sean más rentables; lo que solucionará problemas como el inventario de seguridad preestablecido, la disponibilidad de materiales en los puestos de trabajo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Planificación agregada

La planificación agregada (también conocida como programación agregada) se ocupa de determinar la cantidad que se producirá y cuándo se producirá en un futuro a medio plazo, generalmente entre 3 y 18 meses. El objetivo de la planificación agrega es minimizar el coste total durante el periodo de planificación (Heizer & Render, 2016).

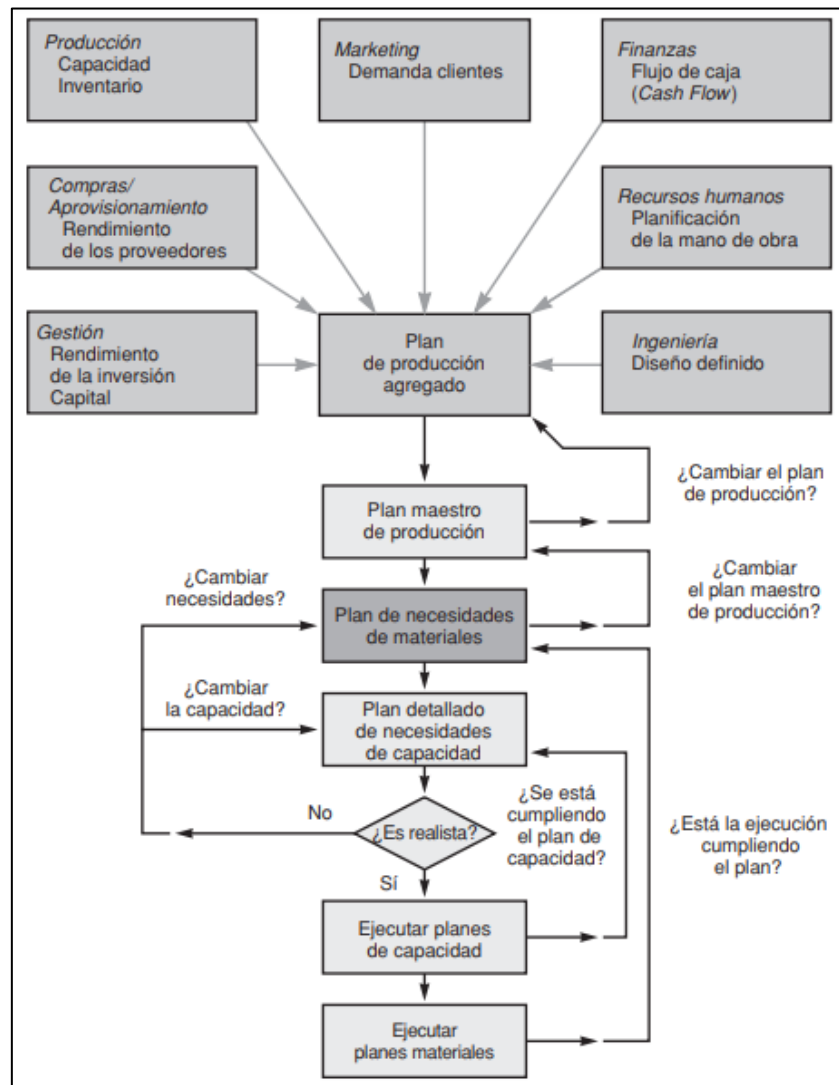


Figura 1: Proceso de planificación

Fuente: “Dirección de la Producción y de Operaciones. Decisiones Tácticas”. (Heizer & Render, 2016)

2.1.1 Estrategia de seguimiento o caza

Según (Heizer & Render, 2016), una estrategia de seguimiento o caza, trata de obtener niveles de producción que equiparen la previsión de la demanda para cada periodo.

Se podrían tomar decisiones como el despido o contrato de mano de obra, pagar horas extras a los trabajadores, subcontratar la producción a otra empresa o completar las horas de los trabajadores que tienen contrato a medio tiempo.

2.1.2 Estrategia de planificación nivelada o estable

Según (Heizer & Render, 2016), una estrategia de estabilidad, radica en un plan agregado en el que la producción diaria es periodo a periodo. Empresas como Toyota y Nissan mantienen niveles de producción uniformes y pueden admitir que el inventario de productos terminados aumente o reduzca para aminorar la diferencia entre demanda y la producción o hallar un trabajo alternativo para los empleados.

2.1.3 Métodos de Planificación Agregada

Muchas de las empresas no se conformarán con las estrategias mencionadas anteriormente, lo cual las llevará a buscar nuevas formas de minimizar el costo total y analizarán las estrategias mixtas para conseguir el mínimo costo.

Existen una gran variedad de estrategias mixtas ya que no es posible encontrar un plan agregado óptimo, por lo que la mayoría de las empresas toman como medida la modificación del plan agregado de años anteriores para así ajustarlo a la demanda actual.

2.1.3.1 Métodos de tablas y gráficos

Las técnicas de tablas y gráficos son muy populares, ya que son fáciles de entender y de utilizar. Básicamente estos planes funcionan con unas pocas variables al mismo tiempo para permitir a los planificadores comparar la demanda estimada con la capacidad existente. Son métodos de prueba y error que no garantizan un plan de producción óptimo, pero requieren

sólo unos pocos cálculos sencillos y pueden ser realizados por el personal de oficina (Heizer & Render, 2016).

Los métodos gráficos siguen estos cinco pasos:

- Determinar la demanda en cada periodo.
- Determinar la capacidad con el horario del trabajo regular, en las horas extras y la subcontratación de cada periodo.
- Hallar los costos de la mano de obra, los de contratación, de despido y los costos de almacenamiento.
- Considerar la política de la empresa que debe aplicarse a los trabajadores o a los niveles de existencias.
- Desarrollar planes alternativos y examinar sus costos totales.

2.1.3.2 Método del transporte de la programación lineal.

Cuando un problema de planificación agregada es visto como un problema de cómo asignar capacidad operativa para igualar la demanda prevista, entonces se puede formular como un problema de programación lineal.

Este método no es un método de prueba y error como los métodos de tablas y gráficos, sino que proporciona un plan óptimo para minimizar los costos. Es también flexible en tanto que puede especificar la producción a efectuar en horario normal o en horas extras para cada periodo de tiempo, el número de unidades que deben ser subcontratadas, los turnos de trabajo extras y el inventario transferido de un periodo al siguiente (Heizer & Render, 2016).

2.2. Pronósticos

El pronóstico es el proceso en el cual se predice eventos futuros como la cantidad de productos que se deben fabricar en una empresa.

El pronóstico se puede clasificar en cuatro tipos básicos: cualitativo, análisis de series de tiempo, relaciones causales y simulación. Las técnicas cualitativas son subjetivas y se basan en estimados y opiniones. El análisis de series de tiempo, se basa en la idea de que es posible utilizar información relacionada con la demanda pasada para predecir la demanda futura. El pronóstico causal, que se analiza utilizando la técnica de la regresión lineal, supone que la demanda se relaciona con algún factor subyacente en el ambiente. Los modelos de simulación permiten al encargado del pronóstico manejar varias suposiciones acerca de la condición del pronóstico (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009, pág. 469).

2.3. Modelos de Pronósticos

2.3.1 Promedio Móvil Simple

Cuando la demanda de un producto no aumenta ni disminuye con rapidez, y si no tiene características estacionales, un promedio móvil puede ser útil para eliminar las variaciones aleatorias del pronóstico. Aunque los promedios de movimientos casi siempre son centrados, es mejor utilizar datos pasados para predecir el periodo siguiente de manera directa. Para ilustrar, un promedio centrado de cinco meses ejemplo (enero, febrero, marzo, abril y mayo da un promedio centrado en marzo) (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

Sin embargo, los cinco meses de datos deben existir. Si el objetivo es pronosticar para junio, se debe proyectar el promedio de movimientos de marzo a junio. Si el promedio no está centrado, sino que se encuentra en un extremo, se puede pronosticar con mayor facilidad, aunque quizá se pierda cierta precisión. Por lo tanto, si se quiere pronosticar para junio con un promedio móvil de cinco meses, puede tomarse el promedio de enero, febrero, marzo, abril y mayo. Cuando pase junio, el pronóstico para julio será el promedio de febrero, marzo, abril, mayo y junio.

La fórmula de un promedio móvil simple es:

$$F_t = \frac{A_{t-1} + A_{t-2} + A_{t-3} + \dots + A_{t-n}}{n}$$

F_t : Pronóstico para el siguiente periodo

n : Número de periodos para promediar

A_{t-1} : Ocurrencia real en el periodo pasado

$A_{t-2}, A_{t-3}, A_{t-n}$: Ocurrencias reales hace dos periodos, hace tres periodos, y así sucesivamente, hasta hace n periodos.

2.3.2 Promedio Móvil Ponderado

Un promedio móvil ponderado permite asignar cualquier importancia a cada elemento, siempre y cuando la suma de todas las ponderaciones sea igual a uno (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

La fórmula para un promedio móvil ponderado es:

$$F_t = w_1 A_{t-1} + w_2 A_{t-2} + \dots + w_n A_{t-n}$$

Donde:

w_1 : Ponderación dada a la ocurrencia real para el periodo $t - 1$

w_2 : Ponderación dada a la ocurrencia real para el periodo $t - 2$

w_n : Ponderación dada a la ocurrencia real para el periodo $t - n$

n : Número total de periodos en el pronóstico

Aunque quizás se ignoren muchos periodos, es decir, sus ponderaciones son de cero y el esquema de ponderación puede estar en cualquier orden, por ejemplo, los datos más distantes

pueden tener ponderaciones más altas que los más recientes), la suma de todas las ponderaciones debe ser igual a uno.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Donde:

- 1 es similar al 100%
- 0 es similar al 0%,

2.3.3 Suavización Exponencial

En estos métodos, al agregar cada nueva pieza de datos, se elimina la observación anterior y se calcula el nuevo pronóstico. En muchas aplicaciones, las ocurrencias más recientes son más indicativas del futuro que aquellas en el pasado más distante. Si esta premisa es válida significa que la importancia de los datos disminuye conforme el pasado se vuelve más distante, es probable que el método más lógico y fácil sea la suavización exponencial (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

La razón por la que se llama suavización exponencial es que cada incremento en el pasado se reduce $(1 - \alpha)$. Por ejemplo, si α es 0.05, las ponderaciones para los distintos periodos serían los siguientes, α se define a continuación:

Tabla 1: Ponderaciones para los periodos

	Peso en $\alpha = 0,5$
Peso más reciente = $(1 - \alpha)^0$	0,0500
Datos de un periodo anterior = $\alpha (1 - \alpha)^1$	0,0457
Datos de dos periodos anteriores = $\alpha (1 - \alpha)^2$	0,0451
Datos de tres periodos anteriores = $\alpha (1 - \alpha)^3$	0,0429

Fuente: “Administración de Operaciones. Producción y cadena de suministros”. (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009)

2.3.3.1 Elección del valor apropiado para alfa

La suavización exponencial requiere de dar a la constante de suavización alfa (α) un valor entre 0 y 1. Si la demanda real es estable, como la demanda de electricidad o alimentos, sería deseable una alfa pequeña para reducir los efectos de los cambios a corto plazo o aleatorios. Si la demanda real aumenta o disminuye con rapidez, como en los artículos de moda o los aparatos electrodomésticos menores, se quisiera una alfa alto para tratar de seguirle el paso al cambio (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

Hay dos estrategias para controlar el valor de alfa. Una de ellas utiliza distintos valores de alfa y la otra una señal de seguimiento.

- **Dos o más valores predeterminados de alfa:** Se mide la cantidad de error entre el pronóstico y la demanda real. Dependiendo del grado de error, se utilizan distintos valores de alfa. Si el error es grande, alfa es 0.8; si el error es pequeño, alfa es 0.2.
- **Valores calculados de alfa:** Una constante de rastreo alfa calcula si el pronóstico sigue el paso a los cambios genuinos hacia arriba o hacia abajo en la demanda (en contraste con los cambios aleatorios). En esta aplicación, la constante de rastreo alfa se define como el error real suavizado exponencialmente dividido entre el error absoluto suavizado exponencialmente. Alfa cambia de un periodo a otro en el rango posible de 0 a 1.

En el método de suavización exponencial, sólo se necesitan tres piezas de datos para pronosticar el futuro: el pronóstico más reciente, la demanda real que ocurrió durante el periodo de pronóstico y una constante de uniformidad alfa (α).

La ecuación para un solo pronóstico de uniformidad exponencial es simplemente:

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1})$$

Donde:

F_t : El pronóstico suavizado exponencialmente para el periodo t

F_{t-1} : El pronóstico suavizado exponencialmente para el periodo anterior

A_{t-1} : La demanda real para el periodo anterior

α : El índice de respuesta deseado, o la constante de suavización

2.4. Errores de Pronóstico

El error del pronóstico se refiere a la diferencia que existe entre el valor de la cantidad pronosticada y el valor real, estos valores se los denomina residuales siempre y cuando estén dentro de los límites de confianza, al analizar los errores de pronóstico, es conveniente distinguir entre las fuentes de error y la medición de errores.

2.4.1 Desviación Absoluta Media (MAD)

Mide la dispersión del error de pronóstico o dicho de otra forma, la medición del tamaño del error en unidades. Es el valor absoluto de la diferencia entre la demanda real y el pronóstico, dividido sobre el número de periodos

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n}$$

t: Número del periodo

A: Demanda real para el periodo

F: Demanda pronosticada para el periodo

n: Número total de periodos

2.4.2 Error Medio Cuadrático (MSE)

El MSE es una medida de dispersión del error de pronóstico, no obstante esta medida maximiza el error al elevar al cuadrado, castigando aquellos periodos donde la diferencia fue más alta a comparación de otros. Por ende, se recomienda el uso del MSE para periodos con desviaciones pequeñas.

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}$$

2.4.3 Porcentaje del Error Medio Absoluto (MAPE)

Éste se calcula como el promedio de las diferencias absolutas encontradas entre los valores pronosticados y los reales, y se expresa como un porcentaje de los valores reales. Es decir, si hemos pronosticado n periodos y los valores reales corresponden a esa misma cantidad de periodos (Byers, 2014).

El MAPE se calcula como:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}}{n}$$

2.4.4 Porcentaje Medio de Error (MPE)

Es la media de los errores porcentuales en valor absoluto, no considera el signo del error solo la magnitud. Es una de las mediadas más utilizadas a nivel mundial, pero no necesariamente es la mejor (Portilla, 2014).

$$MPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{|A_t|}}{n}$$

2.5. Análisis de Regresión Lineal

Regresión es una relación funcional que existe entre dos o más variables, se las usa para pronosticar una variable en base a la otra, la regresión lineal trata la relación que existe entre algunas variables y están forman una línea recta.

La principal restricción al utilizar el pronóstico de regresión lineal es, como su nombre lo implica, que se supone que los datos pasados y los pronósticos futuros caen sobre una recta. Aunque esto no limita su aplicación, en ocasiones, si se utiliza un periodo más corto, es posible usar el análisis de regresión lineal (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

La ecuación de los mínimos cuadrados para la regresión lineal es:

$$Y = a + bx$$

Y: Variable dependiente calculada mediante la ecuación

A: Secante Y o intercepto Y

b: Pendiente de la recta

x: Periodo

2.6 Inventarios

Un inventario es el conjunto de productos almacenados en una empresa, según (Schroeder, Goldstein, & Rungtusanatham, 2011) “El Inventario es un cúmulo de materiales que se utilizan para facilitar la producción o para satisfacer las demandas de los clientes. Los inventarios típicos incluyen la materia prima, la producción en proceso y los productos terminados.”

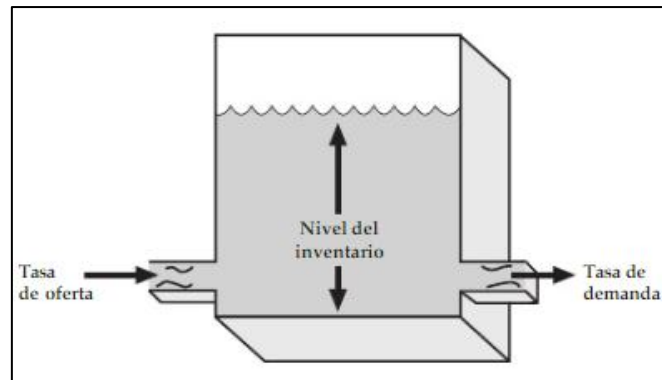


Figura 2: Analogía del inventario como un tanque de agua.

Fuente: “Administración de Operaciones. Conceptos y casos contemporáneos”. (Schroeder, Goldstein, & Rungtusanatham, 2011)

2.6.1 Inventarios de Materia Prima

Los inventarios de materia prima son todos los materiales con los que se elaboran los productos, pero que todavía no han recibido procesamiento.

2.6.2 Inventarios de Productos en Proceso

Son aquellos inventarios en los cuales están plasmados los bienes adquiridos por la empresa que se encuentran en proceso de manufactura.

2.6.3 Inventario de Productos Terminados

Son aquellos inventarios en los cuales constan los productos que están listos para ser comercializados por la empresa.

2.6.4 Modelo básico de la cantidad económica de pedido (EOQ)

El modelo EOQ calcula la cantidad que debe pedirse o producirse minimizando los costos de colocación del pedido para el inventario y los costos de manejo de inventarios (Noori & Radford, 1997).

Según (Heizer & Render, 2016) el modelo de la cantidad económica de pedido (EOQ) es una de las técnicas de control de inventarios más antiguas y más conocidas. Esta técnica es relativamente fácil de usar pero está basada en varios supuestos:

- La demanda es conocida, constante e independiente.
- El plazo de aprovisionamiento (es decir, el tiempo desde que se cursa el pedido hasta que se recibe la mercancía) es conocido y constante, y en este modelo es cero.
- La recepción del inventario es instantánea y completa. En otras palabras, la cantidad pedida llega de una vez y en un solo lote.
- No hay posibilidad de descuentos por cantidad.
- Los únicos costes variables son el coste de preparar o de efectuar un pedido (coste de lanzamiento) y el coste de mantener el inventario a lo largo del tiempo (coste de posesión o mantenimiento). Estos costes fueron comentados en la sección anterior.
- Se pueden evitar completamente las roturas de stock si se cursan los pedidos en el momento adecuado.

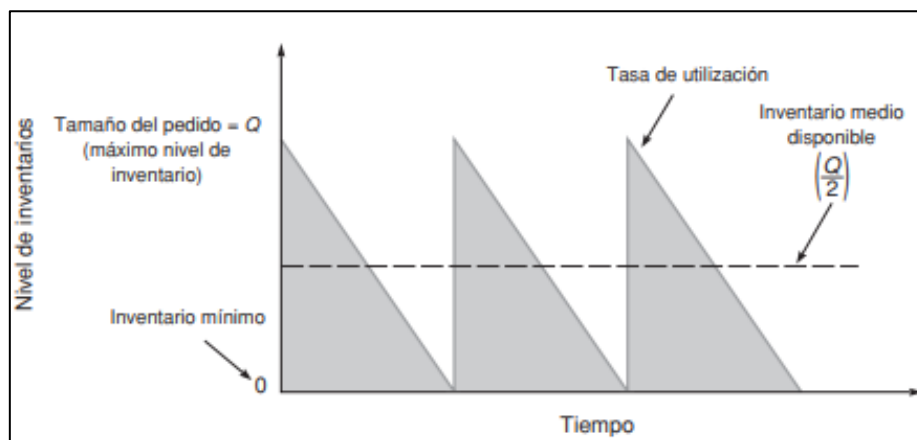


Figura 3: Utilización del inventario a lo largo del tiempo

Fuente: “Dirección de la Producción y de Operaciones. Decisiones Tácticas” (Heizer & Render, 2016)

El objetivo de la mayoría de los modelos de inventarios es minimizar los costes totales. Con los supuestos que acabamos de ver, los costes significativos son los de preparación o de lanzamiento y los de almacenamiento o tenencia. Todos los demás costes, como el coste del propio inventario, son constantes. Por tanto, si minimizamos la suma de los costes de preparación y de almacenamiento, estaremos minimizando también el coste total.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 * D * S}{H}}$$

Q^* = Número óptimo de unidades por pedido (EOQ)

D = Demanda anual en unidades del artículo de inventario

S = Coste de preparación o de lanzamiento de cada pedido

H = Coste de almacenamiento por unidad y año

2.7. Plan Maestro de Producción (MPS)

El Plan Maestro de Producción o también conocido por su nombre en inglés, Master Production Schedule (MPS), es un plan el cual detalla la cantidad de productos finales que se deben producir, en un tiempo determinado por el cliente y por el empresario, teniendo en cuenta la capacidad de producción de la empresa.

El MPS es un plan realizado a corto y mediano plazo, el objetivo principal, es establecer un calendario de producción para cada uno de los productos que la empresa fábrica, en el cual se establecerá las restricciones de tiempos de entrega, aprovechando de una manera eficiente la capacidad productiva instalada en la empresa.

El programa maestro de producción nos dice lo que se necesita para satisfacer la demanda y cumplir con el plan de producción. Este programa establece qué artículos hay que producir y cuándo: Desagrega el plan de producción agregado. Mientras que el plan de producción agregado se define en términos muy amplios (agregados), tales como familias de productos, el plan maestro de producción se establece en términos de productos específicos (Heizer & Render, 2016, pág. 154).

2.8. Programación de la Producción

La programación ayuda a la determinación de cuando se debe iniciar y cuando se debe terminar cada lote de producción, que máquinas se van a utilizar, que empleados van a realizar una acción determinada y cuáles serán las operaciones que se van a realizar.

2.8.1 Programación hacia adelante (forward)

Este tipo de programación empieza cuando se conocen los requerimientos del trabajo y se le aplica principalmente en hospitales, clínicas, restaurantes y fábricas de máquinas de herramientas. En estas organizaciones los trabajos se les realiza contra pedido del cliente y se deben entregar lo más antes posibles.

La programación hacia adelante se diseña habitualmente para elaborar un programa que pueda ser cumplido incluso si eso significa no satisfacer la fecha prevista de entrega. En muchos casos, la programación hacia adelante provoca un aumento del inventario de trabajo en curso (Heizer & Render, 2016, pág. 204).

2.8.2. Programación hacia atrás (backward)

Se inicia a partir de la fecha de entrega, programando primero la última operación a realizar en el trabajo. Las etapas del trabajo se programan entonces, de una en una, en orden inverso.

Restando el plazo de producción de cada artículo, se obtiene la fecha de inicio. Sin embargo, puede que no haya recursos necesarios para cumplir el programa resultante. La programación hacia atrás se utiliza en muchos entornos de fabricación, así como en entornos de servicios tales como preparar el servicio de un banquete o la programación de una operación quirúrgica. En la práctica, se emplea a menudo una combinación de la programación hacia adelante y hacia atrás, para hallar un equilibrio razonable entre lo que puede conseguirse y las fechas de entrega a los clientes (Heizer & Render, 2016).

2.9. Proceso de ejecución de un MPS factible

Según (Paredes, 2001), alcanzar un MPS supone un procedimiento que parte del plan agregado escogido como el más conveniente que, en términos generales, es el siguiente:

- En primer lugar, hay que desagregar el plan agregado, en términos de componentes de la familia de productos.
- Luego, hay que desagregar el tiempo para definir un horizonte preciso.
- En seguida, se ejecutan ciertos cálculos sencillos que relacionan los datos del plan agregado con previsiones a corto plazo, disponibilidades de inventario, pedidos en curso y otras fuentes de demanda, para obtener un MPS inicial o propuesto.
- Esta propuesta se convierte en un “Plan de carga aproximado” que se coteja con la capacidad disponible para determinar la posibilidad de implementarlo.
- Si no hay incoherencias se aprueba el MPS propuesto, de lo contrario se lo modifica.

2.10. Dimensiones del Plan Maestro de Producción

2.10.1 Fuentes de la demanda

La demanda es un dato muy importante y el principal al momento de realizar el MPS, se la puede determinar mediante pronósticos o según las órdenes de compra de los clientes.

Es importante definir cuáles serán las fuentes de la demanda para cada caso y además tener en cuenta que la lectura de dichas demandas puede ser variable, dependiendo de los tiempos o barreras de tiempo que se definan (Paz, 2017, pág. 32).

2.10.2 Capacidad de Producción

“En general la capacidad de producción es la tasa máxima de producción de una organización” (Gaither & Frazier, 2000).

Cabe recalcar que para determinar la capacidad de producción se debe basar en la teoría de restricciones, cuyo método sistemático se basa en administrar las restricciones que impiden el progreso de la empresa.

2.10.3 Lista de Materiales

Es un registro en el cual se detalla la totalidad de los componentes de un producto terminado y semi terminado, en donde se muestran las cantidades requeridas por cada componente para realizar una unidad o unidades del producto final.

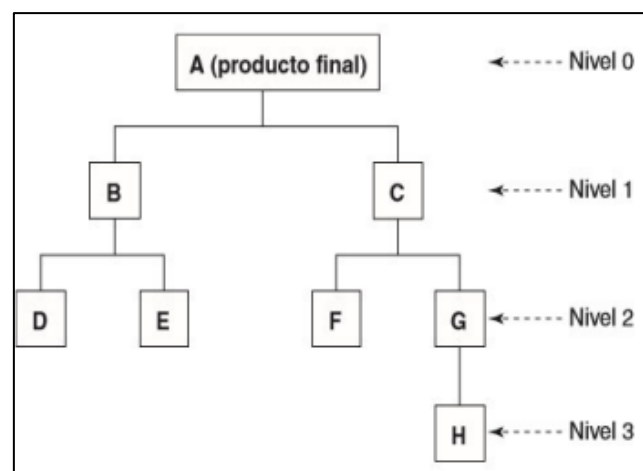


Figura 4: Esquema de lista de materiales.

Fuente: “Planificación y Control de la Producción”. (Chapman & S.N, 2006)

2.10.4 Horizonte del MPS

El lead time es el tiempo que transcurre desde que se inicia un proceso hasta que se completa, por lo tanto, se mencionan los siguientes tipos de lead time más importantes en un proceso de producción (Paz, 2017, pág. 34).

- Lead time de abastecimiento de insumos, desde que se ejecuta la orden de compra (OC) a los proveedores hasta que el insumo está disponible para ser usado para producción.

- Lead time de programación, es el tiempo que el departamento de programación define desde que genera la necesidad en el sistema (mediante una orden de producción), hasta antes de iniciar la producción.
- Lead time de producción, desde que se inicia la producción hasta que el producto terminado está disponible en el almacén de productos terminados.

El horizonte del MPS debe ser por lo menos igual a la suma del lead time, para de esta manera no tener inconvenientes al momento de entregar los productos a tiempo.

2.11 Metaheurísticas

Las metaheurísticas se refieren al diseño de los tipos fundamentales de procedimientos heurísticos de solución de un problema de optimización (Moreno, 2004).

Estos procedimientos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la mecánica estadística (Osman & Kelly, 1996).

Las técnicas metaheurísticas de mayor relevancia son: algoritmos genéticos, búsqueda tabú, recocido simulado, búsqueda scatter, colonias de hormigas, GRASP; las redes neuronales también son consideradas como dichas técnicas y además es una de las más utilizadas.

Estas técnicas obtienen soluciones que cumplen con la calidad requerida y los tiempos de demora impuestos en el campo industrial, además permiten estudiar clases genéricas de problemas en lugar de instancias de problemas particulares. En general, las técnicas que obtienen mejores resultados (en precisión y esfuerzo) al resolver problemas complejos y del mundo real usan metaheurísticas. Sus campos de aplicación van desde la optimización

combinatoria, bioinformática, telecomunicaciones a la economía, ingeniería de software, etc., que necesitan soluciones rápidas con alta calidad (Alba, Luque, & Nesmachnow, 2013).

Existen diferentes formas de clasificar y describir las técnicas metaheurísticas, como se muestra en la **Figura 4**. Una de las clasificaciones más populares las divide en basadas en trayectoria y en población. Las primeras realizan búsquedas orientadas a la explotación del espacio de soluciones al manipular en cada paso un único elemento de dicho espacio. En tanto que, las segundas son métodos orientados a la exploración del espacio de búsqueda, ya que trabajan sobre un conjunto de elementos (población) (Crainic & Toulouse, 2003).

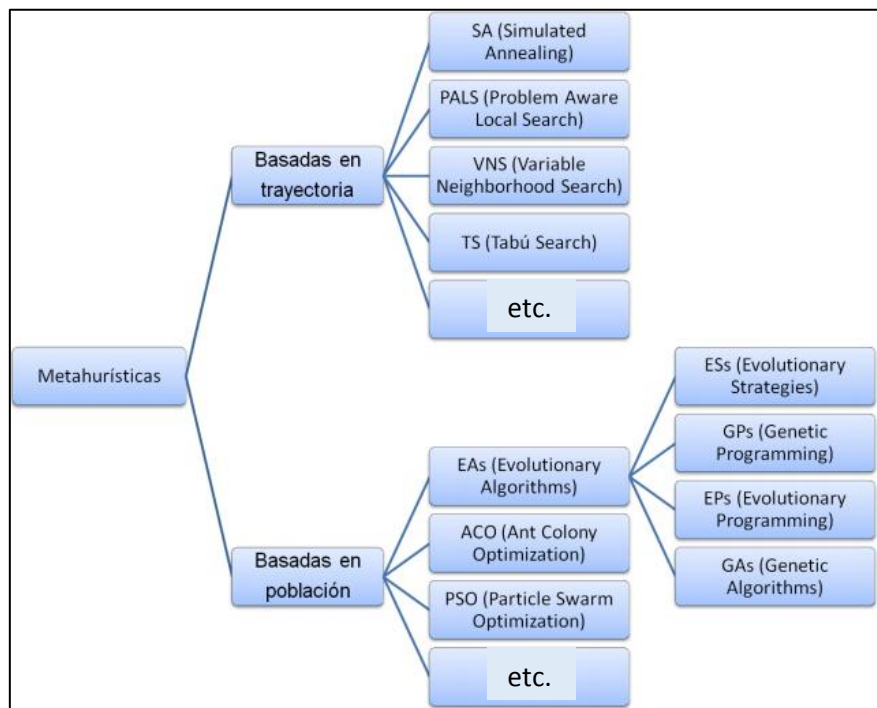


Figura 5: Clasificación de las metaheurísticas.

Fuente: “A taxonomy of hybrid metaheuristic”. (Talbi, 2002)

2.11.1 Algoritmo Genético

Básicamente los algoritmos genéticos establecen una relación entre las posibles soluciones de un problema y los individuos de una población natural codificando la información de cada solución en un vector binario al cual anteriormente llamamos cromosoma, para ello es

necesario incluir algún mecanismo de selección de modo que los cromosomas con mayor “fitness” se reproduzcan más frecuentemente que otros (Herrera, 2015).

Para la creación de un algoritmo genético es necesario establecer los siguientes puntos:

- **Representación cromosómica:** Puede hacerse mediante vectores binarios o cadenas de números entre 0 y 1, por ejemplo (01000100001000100010) para un TSP sobre 5 ciudades y 20 aristas, la segunda opción es usar una configuración libre, por ejemplo (2,3,1,5,4) para el mismo TSP (travelling salesman problem). Dentro del presente estudio se usará la segunda, dado que bajo dicha representación las rutas pueden entenderse más fácilmente y permite definir las operaciones posteriores de forma más estable (Marti, 2003) (Moujahid, Inza, & Larrañaga, 2008).
- **La población inicial** se puede generar aleatoriamente o mediante la utilización de un método heurístico, sin embargo es necesario poseer una diversidad de tipos de individuos que representen a la mayor parte de la población para evitar caer en un óptimo local desde el principio (Marti, 2003).

Basado en Back y Rezende, el pseudo-código que se muestra a continuación, ilustra los principios generales de los algoritmos genéticos. En primer lugar, sin embargo, es necesario definir los parámetros de configuración de la GA, como el tamaño de la población, los criterios de parada, las estrategias de selección, la función de aptitud, el cruce y la mutación (Soares & Vieira, 2009).

```
1. Generar la población inicial  $P(0)$ .
2. Para cada individuo  $i$  en la población actual  $P(t)$ . Entonces
3.     Evaluar la aptitud física individual.
4. Fin si
5. Mientras que los criterios de parada no logrados lo hacen. Entonces
6.     Seleccionar individuos candidatos para el cruce de la población  $P(t)$ .
7.     Aplique el operador cruzado en los individuos seleccionados.
8.     Aplicar el operador de la mutación en la población  $P(t)^*$ .
9.         Para cada individuo  $i$  en la población actual  $P(t)^*$ . Entonces
10.            Evaluar el ajuste individual de  $i$ .
11.         Fin si
12. Fin
```

Fuente: “A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems based on genetic algorithm” (Soares & Vieira, 2009)

Según (Herrera, 2015) el cual utilizó el algoritmo genético para resolver el problema del ruteo vehicular con ventanas de tiempo en una empresa comercializadora de autopartes en Quito en donde las soluciones brindadas por la misma en cuanto a la secuenciación de las rutas ofrecieron mejoras aproximadamente en 20% comparando con la secuenciación empírica que se realizaba en la empresa estudiada y en cortos tiempos de ejecución, lo cual representa grandes ahorros en costos logísticos y optimización de la distribución de autopartes para la empresa estudiada.

Según (Valdiviezo, 2016) menciona que, a través del desarrollo del Diseño y Aplicación de Técnicas Metaheurísticas para el Control de Tráfico, mediante la aplicación de un algoritmo genético para la optimización de la duración de los ciclos de los semáforo, lo cual se ha logrado obtener resultados deseados y favorables.

De acuerdo a (Rincón, 2006) quien realizó la Aplicación de Algoritmos Genéticos en la Optimización del Sistema de Abastecimiento de Agua de Barquisimeto – Cabudare y concluyo que el AG arrojó resultados favorables y benéficos, los cuales indican que se debe realizar una ampliación inmediata del sistema para satisfacer las necesidades y requerimientos de la población.

Al realizar la Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos: aportación al control de la geometría de las actividades, (Diego-Mas, 2006) menciona que el potencial geométrico del árbol de cortes permite realizar la agrupación de los ítems a distribuir mediante cortes de un dominio basándose en criterios geométricos, en una fase de resolución del problema en la que no se conoce la disposición que finalmente adoptarán los ítems o, incluso, la forma de la zona de ubicación. Los

resultados experimentales indican la eficacia del potencial geométrico del árbol, como indicador de la posibilidad de que un determinado árbol pueda generar soluciones geoméricamente aceptables, tanto para un dominio de ubicación de forma fija como de forma libre.

2.11.2 Búsqueda Tabú (Tabú Search)

La Búsqueda Tabú (Tabú Search - TS) es un procedimiento metaheurístico cuya característica distintiva es el uso de memoria adaptativa y de estrategias especiales de resolución de problemas. Su filosofía se basa en la explotación de diversas estrategias inteligentes para la resolución de problemas, basadas en procedimientos de aprendizaje (Batista & Glover, 2006).

La Búsqueda Tabú a pesar de ser una de las más antiguas y el método más sencillo para solucionar problemas de optimización, este empieza eligiendo una solución factible y a través de una subrutina de mejora encuentra una mejor solución para el problema que se esté tratando en ese momento, y de esa manera buscará la solución óptima, el algoritmo termina de actuar cuando se encuentre con un óptimo local.

La idea básica del método, es la de explorar el espacio de búsqueda de todas las soluciones factibles por una secuencia de movimientos. Un movimiento de una solución a otra es el mejor disponible, es decir, de todas las soluciones a las que se puede pasar se escoge la que mejore más el o los objetivos deseados (San Martín, 2006).

Según (Bodas, 2017) la Búsqueda Tabú debe tener en cuenta los siguientes factores:

- **Solución Inicial:** Es posible comenzar con una solución obtenida mediante un algoritmo constructivo o de una solución aleatoria. Otra posibilidad es ejecutar varias veces la búsqueda local partiendo de diferentes soluciones iniciales y seleccionar entre ellas la mejor para utilizarla como solución inicial.

- **Elección del Entorno:** Es determinante elegir correctamente el entorno a explorar debido a que, si esta zona es grande, requiere mayor tiempo de búsqueda y ofrece una buena solución, mientras que si la zona vecina a explorar es pequeña, se ejecuta más rápido pero puede llevar a una convergencia rápida a un óptimo local. Asociado a este punto, cabe señalar que si se decide trabajar con entornos pequeños, es importante partir de una solución inicial buena. Por el contrario, si se elige un entorno grande, no es significativa la calidad de la solución inicial en la calidad de la solución final.
- **Subrutina de Mejora:** Puede seguir dos estrategias distintas. Una de ellas consiste en aceptar como válida la primera solución encontrada que mejore la solución inicial. La otra opción consiste en explorar todo el entorno y seleccionar la solución final como la mejor solución entre las soluciones exploradas.

Según (Velez, Hincapié, & Gallego, 2014) obtuvieron resultados favorables al aplicar la técnica de Búsqueda Tabú en el diseño de redes secundarias de energía eléctrica, esta técnica ayudó a determinar el tamaño y ubicación de circuitos secundarios, transformadores de distribución y tramos de red primaria. Adicionalmente consideró la reubicación de transformadores de distribución, y costos asociados a pérdidas de energía en transformadores de distribución y conexión entre red primaria y secundaria.

El pseudo código para utilizar la Búsqueda Tabú es la siguiente:

```

1. X = SolucionInicialFactible;
2. tmax = MaximoNumeroDeIteraciones;
3. MejorSolucion = X;
4. NumeroDeSoluciones = t = 0;
5. ListaTabu = ListaTabuVacía ( );
6.
7. MIENTRAS (NO TodosMovimientosPosiblesSonTabu ( ) o (t < tmax) ) {
8. SI ((DX (t+1)= ElegirMejorMovimientoNoTabuFactible (X(T))) ! =
Vacio)
9. X (t+1) = Modificar ( X ( t ) , DX ( t+1 ) );
10. SI (Valor (X (T+1) ) > Valor (MejorSolucion) )
11. MejorSolucion = X (t+1)
12. EliminarMovimientosTabuAntiguos(ListaTabu,t) ;
13. AgregarMovimientosTabu (X (t), X (t+1) );
14. t = t + 1

```

```

15. }
16. Devolver (MejorSolucion);

```

Fuente: “Técnicas heurísticas y metaheurísticas para el problema de la máxima diversidad (maximum diversity problem (MDP))”. (Franco, 2015)

2.11.3 Recocido Simulado (Simulated Annealing)

Este método es uno de los más utilizados para dar soluciones a los problemas de optimización combinatoria y uno de los que ha presentado buenos resultados en todos los campos que ha sido aplicado. En la teoría hace referencia al tratamiento térmico de los metales, el recocido consiste en someter a altas temperaturas a un metal por largo tiempo, para que luego se enfríe lenta y uniformemente, desde el punto de optimización, el estado final del metal hace referencia a la solución óptima del objetivo de minimizar la energía remanente.

Consiste en generar aleatoriamente una solución cercana a la solución actual (o en el entorno de la solución) y la acepta como buena si consigue reducir una determinada función de costo, o con una determinada probabilidad de aceptación (Alancay & Villagra, 2014).

En la idea básica se parte de una solución inicial y se selecciona al azar una solución vecina. Si la solución vecina es mejor, se adopta como la nueva solución. Si no lo es, se acepta como la nueva solución con una probabilidad que decrece a medida que el algoritmo avanza. La idea de aceptar con cierta probabilidad soluciones de menor calidad le permite al algoritmo salir de óptimos locales (Vélez & Montoya, 2008).

El pseudo código del Algoritmo de Recocido Simulado es el que se muestra a continuación:

```

1. Sean  $T_i$  ,  $T_f \in (0,1)$  las temperaturas iniciales y final respectivamente
2. Sea  $T$  la Temperatura
3. Sea  $n$  el número de iteraciones por nivel
4. Sea  $\varepsilon \in (0,1)$  la tasa de enfriamiento
5.
6. Hacer  $h_0 \leftarrow f(X_0)$  ,  $h_{\text{optimo}} \leftarrow h_0$  ,  $x_{\text{optimo}} \leftarrow X_0$ 
7. Hacer  $T \leftarrow T_i$ 

```

```

8. Mientras  $T \geq T_f$ 
9.   Hacer  $k \leftarrow 1$ 
10.  Mientras  $k \leq n$ 
11.    Seleccionar al azar  $X_v \in N(X_{optimo})$ 
12.    Si  $f(X_v)$  es una mejor solución que  $f(X_{optimo})$ 
13.      Hacer  $X_{optimo} \leftarrow X_v$ 
14.    Sino
15.      Generar un número aleatorio  $r$  uniforme en el intervalo  $(0,1)$ ,
16.      Si  $r \leq T$ 
17.        Hacer  $X_{optimo} \leftarrow X_v$ 
18.      Fin
19.    Fin
20.    Hacer  $k \leftarrow k + 1$ 
21.  Fin
22.  Hacer  $T \leftarrow \varepsilon * T$ 
23. Fin

```

Fuente: “Metaheurísticos: Una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones”. (Vélez & Montoya, 2008)

La Figura 6, ilustra un problema en el que se desea encontrar el valor de x que minimiza la función $f(x)$, donde $N(x)$ representa el vecindario de x . Si durante la búsqueda, el método de optimización llega a x^0 y el método no acepta soluciones de inferior calidad en $N(x^0)$, el método queda atrapado en el óptimo local x^0 . Estas situaciones son las que metaheurísticos como el recocido simulado tratan de evitar al aceptar, eventualmente y por diversos mecanismos, soluciones de menor calidad, para mejorar la probabilidad de llegar a x^1 , el óptimo global (Vélez & Montoya, 2008).

Este método ayuda a que la probabilidad de elegir soluciones de menor calidad disminuya de acuerdo como avance el algoritmo.

Según (Torres & Velez, 2007) El algoritmo de recocido simulado probó ser efectivo para solucionar el problema de la descomposición robusta del horizonte de tiempo en problemas de planeación de producción; sin embargo, su desempeño depende en gran medida del plan de operaciones. Para los planes generados en este trabajo se lograron mejoras hasta del 15 % con respecto a la solución entera inicial.

2.11.4 Búsqueda Scatter

La Búsqueda Scatter es también conocida como Búsqueda Dispersa, esta técnica trabaja sobre un conjunto de soluciones llamado un conjunto de referencia, en donde se combinan las soluciones para crear nuevas soluciones, que mejoren a las que las originaron (Martí & Laguna, 2003).

Scatter Search es un método metaheurístico para resolver problemas de optimización. Fue introducido en los años setenta, ha sido probado en muchos problemas con grado de dificultad alto obteniendo gran éxito. Pertenece a la familia de los Algoritmos Evolutivos, los cuales se distinguen por estar basados en la combinación de un conjunto de soluciones. Aunque tiene similitudes con los Algoritmos Genéticos, se diferencia de éstos por sus principios fundamentales, tales como el uso de estrategias sistemáticas en lugar de aleatorias. Scatter Search proporciona un marco flexible que permite el desarrollo de diferentes implementaciones con distintos grados de complejidad (Martí & Laguna, 2003).

El pseudo código del Algoritmo de Búsqueda Scatter es el que se muestra a continuación:

1. Comenzar con $P = \emptyset$, Utilizar el **método de generación** para construir una solución y el **método de mejora** para tratar de mejorarla, sea x la solución obtenida. Si $x \notin P$ entonces añadir x a P , (i.e., $P = P \cup x$), en otro caso, rechazar x . Repetir esta etapa hasta que P tenga un tamaño prefijado.
2. Construir el **conjunto de referencia** $\text{RefSet} = \{x^1, \dots, x^b\}$ con las $b/2$ mejores soluciones de P más diversas a las ya incluidas.
3. Evaluar las soluciones en RefSet y ordenarlas de mejor o peor respecto a la función objetivo.
4. Hacer NuevaSolución = VERDAD
- Mientras** (Nueva Solución)
5. NuevaSolución = FALSO
6. Generar los subconjuntos de RefSet en los que haya al menos una nueva solución.
- Mientras** (Queden subconjuntos sin examinar)
7. Seleccionar un subconjunto y etiquetarlo como combinado.
8. Aplicar el **método de combinación** a las soluciones del subconjunto.
9. Aplicar el **método de mejora** a cada solución obtenida por combinación. Sea x la solución mejorada:
Si $(f(x) < f(x^b))$ y x no está en RefSet
10. Hacer
11. Hacer NuevaSolución = VERDAD

Fuente: “Scatter Search: Diseño Básico y Estrategias Avanzadas”. (Martí & Laguna, 2003)

Según (Lara, Gutiérrez, Ramírez, & López, 2005) quienes plantean que el Algoritmo de búsqueda dispersa realizado para obtener buenos resultados ante el problema de colaboración robusta siempre se obtiene las soluciones optimas en las instancias donde se conoce el valor óptimo y encuentra las mejores soluciones conocidas, o las mejora, en aquellas instancias donde no se conoce el óptimo.

2.11.5 Colonias de hormigas

La teoría de optimización por colonia de hormigas u OCH (Ant Colony Optimization, ACO), fue introducida por Marco Dorigo en los inicios de 1990 como herramienta para la solución de problemas de optimización complejos. (Dorigo & Gambardella, 1996).

Estos algoritmos, que están basados en una colonia de hormigas, son agentes computacionales que trabajan de manera conjunta para poder comunicarse a través de rastros de feromonas artificiales (Colorni, Dorigo, & Maniezzo, 1992).

Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas son procesos iterativos, en cada iteración de búsqueda de trayectorias se "lanza" una colonia de m hormigas y cada una de las hormigas de la colonia construye una solución al problema. Estas construyen las soluciones de manera probabilística, guiándose por un rastro de feromona artificial y por una información calculada a priori de manera heurística (Dorigo & Stützle, 2006).

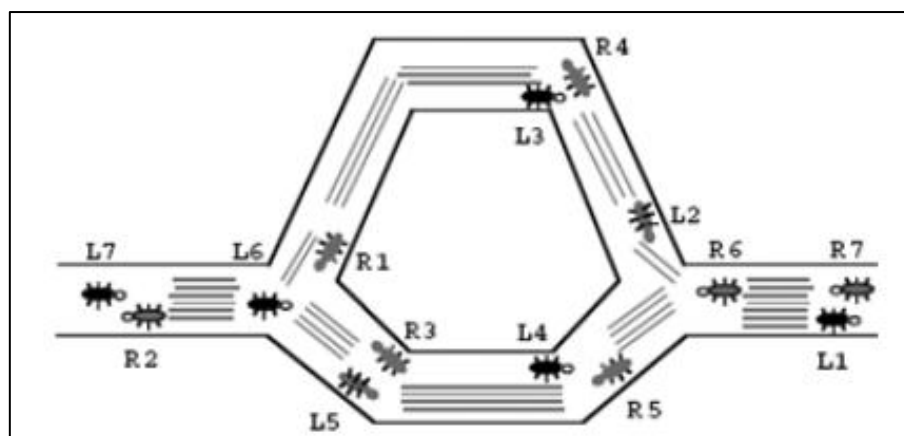


Figura 6: Mayor acumulación de feromonas en el camino más corto.

Fuente: “Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem”. (Dorigo & Gambardella, 1996)

Los algoritmos OCH son programas constructivos: en cada iteración del algoritmo cada hormiga construye una solución al problema a través de un gráfico. Cada arista representa las posibles opciones que el insecto puede tomar y tiene asociada el siguiente tipo de información: Información Heurísticas e Información de los rastros de las feromonas artificiales (Robles, 2010).

Según (Lastre, Lorente, & Cordovés, 2016) quienes aplicaron el método de colonia de hormigas, para el corte de piezas en chapas, el cual garantizó la generación de trayectorias de corte con menor recorrido del útil que el método de la teoría de vecindad, y logra un mejor desempeño en la medida en que aumentan las piezas consideradas en las distribuciones analizadas.

2.11.6 Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP)

La metaheurística GRASP consiste de un proceso iterativo de dos fases: constructiva y búsqueda local. En la primera fase se genera una solución factible, cuya vecindad es examinada mediante una búsqueda local hasta que se encuentra un mínimo local. Al final, la mejor solución encontrada se deja como el resultado al problema (Glover & Kochenberger, 2003).

El funcionamiento de GRASP está estructurado de la siguiente manera:

1. Fase constructiva: se genera una lista de candidatos mediante la utilización de la función greedy, se debe considerar una lista restringida de los mejores candidatos, se selecciona aleatoriamente un elemento de la lista restringida y se repite el proceso hasta construir una solución de partida.

2. Fase de Mejora: Hace un proceso de búsqueda local a partir de la solución construida hasta que no se pueda mejorar más.
3. Actualización: Si la solución obtenida mejora a la obtenida anteriormente, se la debe actualizar.

El pseudo código del Algoritmo GRASP es el que se muestra a continuación:

```

1. Procedimiento GRASP
2.   S ← SolucionInicial
3.   Mientras (no CriterioFin)    {
4.     S' ConstrucccionGltonaAleatoria
5.     Si (S' no es factible)      {
6.       S'' ← Reparar (S')
7.     }
8.     S''' ← BusquedaLocal (S'')
9.     si ( f(S'') < f(S') )      {
10.      S ← S'''
11.    }
12.  }
13.  Regresa S
14. }
```

Fuente: “Handbook of Metaheuristics.”. (Gendreau & Potvin, 2010)

Según (Ruiz & Ruiz, 2006) indican que al utilizar el algoritmo GRASP para cortes de guillotina obtuvieron los resultados deseados con un ahorro en tiempo de ejecución en el proceso y disminución de costo al tener un menor desperdicio.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO

3. DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO

3.1 Modelo Matemático

Es un sistema donde todas las opciones se pueden simular por medio de ecuaciones matemáticas, cuyas variables están previamente establecidas de acuerdo con lo que se quiere demostrar. Permite obtener resultados en base a experiencias anteriores o a estadísticas. Se utiliza en pronósticos de demanda o de ventas, en control de inventarios. Todo modelo matemático tiene un error cuando se compara con la realidad, ya que siempre será un cálculo y factores externos que no permitan la exactitud.

El MPS actúa como puente entre la planificación estratégica y programación de la producción porque armoniza el mercado y la demanda, con los recursos internos de la empresa. Como el número de productos, el número de recursos, y número de períodos (celdas de producción, líneas de producción, líneas de montaje, máquinas.).

La producción y los problemas de planificación generalmente incluyen objetivos contradictorios, por ejemplo, reduciendo el inventario y maximizando los niveles de servicio. Debido a estas complejidades, el uso de heurística o la metaheurística es altamente recomendada en la resolución de estos problemas (Abu, Abbas, AlSattar, Khaddar, & Atiya, 2017).

Según (Mohd, Iraq, Hassan, Abdul-Gabbar, & Bayda, 2017), la optimización multiobjetivo puede ser descrita de la siguiente manera:

$$\text{MinZ} = (f_1x, f_2x, \dots, f_kx,)$$

(1)

Dónde: k = n° de funciones objetivos

$$g_i(x) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

(2)

$$h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

(3)

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(4)

$$g_i \neq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

(5)

Donde:

p: número de restricciones de igualdad.

q: número de desigualdades.

f,g,h,n: son lineales, cuadráticos o funciones más generales.

3.2 Función Objetivo y Resricciones

Se puede definir la función objetiva y sus restricciones como:

$$\text{Minimizar} = C_1 * AIL + C_2 * RNM + C_3 * BSS + C_4 * OC$$

(6)

Donde:

El nivel de inventario medio global, después de tener en cuenta contados todos los productos y el horizonte de planificación completo AIL es:

$$AIL = \sum_{K=1}^K \left(\frac{\sum_{P=1}^P AIL_{kp}}{TH} \right) \quad (7)$$

Las necesidades medias que no se cumplen para todos los períodos y productos RNM es:

$$RNM = \frac{\sum_{K=1}^K \sum_{P=1}^P RNM_{kp}}{TH} \quad (8)$$

La cantidad media que está por debajo del nivel de stock de seguridad, después de tener en cuenta todos los productos y períodos es el BSS:

$$BSS = \frac{\sum_{K=1}^K \sum_{P=1}^P BSS_{kp}}{TH} \quad (9)$$

El promedio de sobrecapacidad requerido, después de considerar todos los recursos y todo el horizonte de planificación completo OC es:

$$OC = \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P OC_{rp} \quad (10)$$

Sujeto a:

$$TH = \sum_{r=1}^R TH_p \quad (11)$$

$$BI_{kp} = \begin{cases} OH_k & se(p = 1) \\ EL_{k(p-1)} & se(p > 1) \end{cases} \quad (12)$$

$$AIL_{kp} = \frac{(EI_{kp} + BI_{kp}) \times TH_p}{2} \quad (13)$$

$$EI_{kp} = \max \left[0, \left((MPS_{kp} + BI_{kp}) - GR_{kp} \right) \right] \quad (14)$$

$$MPST_{kp} = \sum_{r=1}^R MPS_{kpr} \quad (15)$$

$$MPS_{kpr} = BN_{kpr} \times BS_{kpr} \quad (16)$$

$$RNM_{kp} = \max \left[0, \left(GR_{kp} - (MPST_{kp} + BI_{kp}) \right) \right] \quad (17)$$

$$BSS_{kp} = \max \left[0, (SS_{kp} - EI_{kp}) \right] \quad (18)$$

$$CUH_{rp} = \sum_{k=1}^K \frac{(BS_{kp} BN_{kp})}{UR_{kr}} \quad (19)$$

$$CUH_{rp} \leq AC_{rp} \quad (20)$$

$$OC_{rp} = \max \left[0, \left(\frac{CUH_{rp}}{AC_{rp}} - 1 \right) \right] \quad (21)$$

Como se trata de un problema de minimización, una pequeña Z trae la solución más cercana a la solución óptima, Z no puede utilizarse directamente como una posible función de aptitud física. Sin embargo, un cambio puede hacer esto posible y considerar la función como una medida de la aptitud individual, la función se expresa de la siguiente manera:

$$Ajuste = \left[\frac{1}{1 + Z_n} \right] \quad (22)$$

Donde:

$$Z_n = C_1 \frac{AIL}{AIL_{max}} + C_2 \frac{RNM}{RNM_{max}} + C_3 \frac{BSS}{BSS_{max}} + C_4 OC \quad (23)$$

Según (Ribas., 2003) El problema del programa Maestro de Producción puede ser matemáticamente modelado como un programa entero mixto de la siguiente manera:

K: Cantidad total de productos diferentes (SKU).

R: Cantidad total de diferentes recursos productivos.

P: Número total de períodos de planificación.

TH_p: Tiempo disponible en cada período p .

TH: Horizonte de planificación global.

OH_k: Inventario inicial disponible (disponible), al período de programación.

GR_{kp}: Recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período p .

BS_{kp}: Tamaño de lote estándar para el producto k en el período p .

NR_{kp}: Necesidades netas del producto k en el período p , considerando la capacidad infinita.

SS_{kp}: Nivel de inventario de seguridad para el producto k en el período p .

UR_{kr}: Tasa de producción del producto k en el recurso r (unidades por hora).

AC_{rp}: Capacidad disponible, en horas, en el recurso r en el período p .

3.3 Las variables de decisión

BN_{kpr}: Cantidad de tamaños de lote estándar necesarios para la producción del producto k en el recurso r , en el período p .

MPS_{kpr}: Cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r , en el período p .

MPST_{kp}: Cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r , en el período p ; (considerando todos los recursos disponibles r).

BI_{kp} : Nivel de inventario inicial del producto k en el período p .

CUH_{rp} : Capacidad utilizada del recurso r en el período p .

CUP_{rp} : Tasa porcentual obtenida a partir de la relación del número de horas consumidas del recurso r en el período p , y el número disponible de horas al mismo recurso y período.

GR_{kp} : Recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período p .

RM_{kp} : Total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p .

RM_{kpr} : Total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p , en el recurso r .

RNM_{kp} : Requisitos no cumplidos para el producto k en el período p .

SL_{kp} : Nivel de servicio, relación de los requisitos cumplidos, RM_{kp} , y las necesidades brutas del producto k en el período p .

AIL_{kp} : nivel medio de inventario generado para el producto k en el período p .

3.4 Sistematización de las variables de Decisión

Una vez establecido y definido la Función Objetivo con todas sus restricciones, se determinó cada uno de los valores de las variables de decisión para lo cual se tomó como caso de estudio una empresa del territorio, que fue de donde se extrajeron cada uno de los valores de las variables.

Como se muestra en el *Anexo 1* dicha empresa ya cuenta con un MPS establecido e implementado el cual servirá como base para realizar la optimización del MPS.

Dentro de las variables de decisión se les otorgó valores a $K=4$ que es el total de productos que fabrica la empresa, $R=11$ es el número total de máquinas, $P=12$ es el número total de períodos de planificación, el cual fue extraído del pronóstico del último año que realizó la empresa como se muestra en el *Anexo 2*.

El tiempo disponible en cada período p (TH_p) como muestra en la **Tabla 2**, se obtuvo al realizar un promedio entre las horas de producción disponibles (h/mes) del plan agregado de uniformes sublimados y del plan agregado de camisetas de la empresa de caso de estudio.

Tabla 2: *Tiempo disponible en cada período p (TH_p)*

TH_p	Enero	284	Mayo	262	Septiembre	249
	Febrero	224	Junio	262	Octubre	287
	Marzo	267	Julio	274	Noviembre	249
	Abril	262	Agosto	274	Diciembre	223

Fuente: Autor

El horizonte de planificación global (TH), se lo ha obtenido por medio de una suma de los tiempos disponibles de la empresa en cada periodo dando como resultado 3117.

El inventario inicial disponible, al período de programación (OH_k) se obtuvo a partir de la tabla de pronóstico del año 2016, como se muestra en el **Anexo 3**.

Tabla 3: *Inventario inicial disponible.*

OH_k	Uniformes Sublimados	83
	Camisetas Sport	324
	Camisetas Sublimadas	224
	Camisetas Tipo Polo	177

Fuente: Autor

Los recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período p (GR_{kp}) se han obtenido de la base de datos de pronósticos del año 2017 como se muestra en el **Anexo 2**.

Tabla 4: *Los recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período.*

GR_{kp}	Uniformes Sublimados					
	Enero	89	Mayo	140	Septiembre	142
	Febrero	208	Junio	283	Octubre	161
	Marzo	273	Julio	231	Noviembre	192

	Abril	213	Agosto	83	Diciembre	88
	Camisetas Sport					
	Enero	526	Mayo	344	Septiembre	652
	Febrero	272	Junio	437	Octubre	489
	Marzo	251	Julio	322	Noviembre	457
	Abril	399	Agosto	404	Diciembre	623
	Camisetas Sublimadas					
	Enero	224	Mayo	226	Septiembre	217
	Febrero	157	Junio	216	Octubre	354
	Marzo	190	Julio	181	Noviembre	340
	Abril	200	Agosto	199	Diciembre	272
	Camisetas Tipo Polo					
	Enero	194	Mayo	318	Septiembre	181
	Febrero	115	Junio	245	Octubre	213
	Marzo	298	Julio	243	Noviembre	155
	Abril	259	Agosto	294	Diciembre	340

Fuente: Autor

El tamaño de lote estándar para el producto k en el período p (BS_{kp}) se lo obtuvo aplicando la fórmula del tamaño de lote EOQ, en donde la demanda anual y la desviación estándar de cada SKU se las saco de la **Tabla 4**. Al aplicar la fórmula del tamaño de lote estándar se obtuvo lo siguiente:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 * D * S}{H}}$$

$$EOQ_1 = \sqrt{\frac{2 * 2103 * 20}{12 * 0,035}} = 447,53 \text{ u}$$

$$EOQ_2 = \sqrt{\frac{2 * 5176 * 20}{7 * 0,035}} = 919,27 \text{ u}$$

$$EOQ_3 = \sqrt{\frac{2 * 2778 * 20}{9 * 0,035}} = 593,72 \text{ u}$$

$$EOQ_4 = \sqrt{\frac{2 * 2855 * 20}{10 * 0,035}} = 571,21 \text{ u}$$

Los resultados obtenidos se plasmaron en la siguiente tabla:

Tabla 5: *Tamaño de lote estándar para el producto k*

BS_{kp}	Uniformes Sublimados	447,53
	Camisetas Sport	919,27
	Camisetas Sublimadas	593,72
	Camisetas Tipo Polo	571,21

Fuente: Autor

Las necesidades netas del producto k en el período *p*, considerando la capacidad infinita (NR_{kp}) se las obtuvo en relación al pronóstico de la demanda del año 2017 el cual se muestra en el *Anexo 2*.

Tabla 6: *Las necesidades netas del producto k en el período p, considerando la capacidad infinita.*

NR_{kp}		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	Uniformes Sublimados	100	250	300	250	200	300	250	100	150	200	200	100
	Camisetas Sport	600	300	300	400	400	450	350	450	700	500	500	650
	Camisetas Sublimadas	250	200	200	250	250	250	200	250	250	400	250	300
	Camisetas Tipo Polo	200	150	300	300	350	300	300	300	200	250	200	250

Fuente: Autor

El nivel de inventario de seguridad para el producto k en el período *p* (SS_{kp}) se calculó utilizando la demanda anual y la desviación estándar de la demanda, además de la duración del año y el número de turnos de trabajo, como se muestra a continuación:

$$IS_1 = \left(\frac{2103}{365} * 1 \right) + (1,96 * 69,52) = 142,02 \text{ Uniformes Sublimados}$$

$$IS_2 = \left(\frac{5176}{365} * 1 \right) + (1,96 * 127,10) = 263,29 \text{ Camisetas Sport}$$

$$IS_3 = \left(\frac{2776}{365} * 1 \right) + (1,96 * 60,92) = 127,01 \text{ Camisetas Sublimadas}$$

$$IS_4 = \left(\frac{2855}{365} * 1 \right) + (1,96 * 68,68) = 142,43 \text{ Camisetas Tipo Polo}$$

Los resultados se han sintetizado en la tabla siguiente:

Tabla 7: *Inventario de seguridad para el producto k en el período p.*

BS_{kp}	SKU's	Unidades
	Uniformes Sublimados	447,53
	Camisetas Sport	919,27
	Camisetas Sublimadas	593,72
	Camisetas Tipo Polo	571,21

Fuente: Autor

La tasa de producción del producto k en el recurso r (UR_{kr}), se ha obtenido de la relación que existe entre la demanda del año de cada uno de los SKU's, el número de máquinas que existen en la empresa y los días laborables como se muestran en el **Anexo 4** y **Anexo 5**.

Tabla 8: *La tasa de producción del producto k en el recurso r*

UR_{kr}	Proceso	Recurso	Uniformes Sublimados (u/día)	Camisetas Sport	Camisetas Sublimadas	Camisetas Tipo Polo
	Diseño	Máquina 1	5	10	5	6
		Máquina 2	4	11	6	6
	Corte	Máquina 3	5	11	5	6
		Máquina 4	4	10	6	6
	Sublimado	Máquina 5	9	21	11	12
	Confección	Máquina 6	1	4	2	3
		Máquina 7	2	4	2	2
		Máquina 8	2	4	3	2

		Máquina 9	2	4	2	2
		Máquina 10	2	5	2	3
	Planchado	Máquina 11	9	21	11	12

Fuente: Autor

La capacidad disponible, en horas, en el recurso r en el período p (AC_{rp}) se lo obtuvo a través de la multiplicación del total de días laborables de cada mes por el número de horas que funcionan las máquinas, cuya información fue extraída del Balance de Carga como se muestra en el *Anexo 6*.

Tabla 9: Capacidad disponible, en el recurso r en el período p .

AC_{rp}	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Máq. 2	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	Corte	Máq. 3	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Máq. 4	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	Sublimado	Máq. 5	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	Confección	Máq. 6	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Máq. 7	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Máq. 8	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Máq. 9	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Máq. 10	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	Planchado	Máq. 11	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42

Fuente: Autor

La cantidad de tamaños de lote estándar necesarios para la producción del producto k en el recurso r , en el período p (BN_{kpr}) se calculó a través de la fórmula del tamaño de lote estándar EoQ, la cual toma en cuenta el costo por ordenar, el costo unitario, el porcentaje de costo de manejo y la demanda de cada mes como indica la *Tabla 4*.

Tabla 10: La cantidad de tamaños de lote estándar necesarios para la producción del producto k en el recurso r , en el período p .

BN_{kpr}	Uniformes Sublimados (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.

	Diseño	Máq. 1	64,73	99,52	113,81	100,48	81,65	115,88	104,65	62,49	82,23	87,29	95,62	64,73
		Máq. 2	65,47	99,52	114,23	100,95	81,65	116,29	105,11	63,25	82,23	87,83	95,62	64,73
	Corte	Máq. 3	64,73	99,52	113,81	100,48	81,65	115,88	104,65	62,49	82,23	87,29	95,62	64,73
		Máq. 4	65,47	99,52	114,23	100,95	81,65	116,29	105,11	63,25	82,23	87,83	95,62	64,73
	Sublimado	Máq. 5	92,07	140,75	161,25	142,43	115,47	164,17	148,32	88,91	116,29	123,83	135,22	91,55
	Confección	Máq. 6	40,24	62,49	71,71	63,99	51,64	73,03	66,90	40,24	51,64	58,55	60,94	40,24
		Máq. 7	41,40	63,25	71,71	63,25	51,64	73,68	66,19	39,04	51,64	58,55	60,16	41,40
		Máq. 8	41,40	63,25	72,37	63,99	51,64	73,68	66,19	40,24	52,55	58,55	60,16	41,40
		Máq. 9	41,40	62,49	72,37	63,99	51,64	73,68	66,19	39,04	52,55	58,55	60,16	40,24
		Máq. 10	41,40	63,25	72,37	63,25	51,64	73,03	66,19	40,24	51,64	59,36	60,94	41,40
	Planchado	Máq. 11	92,07	140,75	161,25	142,43	115,47	164,17	148,32	88,91	116,29	123,83	135,22	91,55
	Camisetas Sport (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	207,22	149,01	142,86	180,25	167,58	189,09	162,13	181,60	230,70	200,00	193,36	225,70
		Máq. 2	207,22	149,01	143,43	180,70	167,58	188,66	162,13	181,60	230,70	199,59	192,94	225,33
	Corte	Máq. 3	207,22	149,01	142,86	180,25	167,58	188,66	162,13	181,60	230,70	199,59	192,94	225,33
		Máq. 4	207,22	149,01	143,43	180,70	167,58	189,09	162,13	181,60	230,70	200,00	193,36	225,70
	Sublimado	Máq. 5	293,05	210,73	202,43	255,23	236,99	267,11	229,28	256,83	326,27	282,55	273,15	318,93
	Confección	Máq. 6	130,93	93,90	90,35	114,29	106,14	119,86	102,22	115,00	145,69	126,49	122,56	142,28
		Máq. 7	130,93	93,90	90,35	113,57	106,14	119,86	102,22	115,00	145,69	126,49	121,89	142,86
		Máq. 8	131,55	94,76	90,35	114,29	105,37	119,18	102,22	115,00	145,69	126,49	122,56	142,86
		Máq. 9	130,93	94,76	90,35	114,29	106,14	119,18	103,02	114,29	146,25	125,84	121,89	142,86
		Máq. 10	130,93	93,90	91,25	114,29	106,14	119,18	103,02	115,00	146,25	126,49	121,89	142,28
	Planchado	Máq. 11	293,05	210,73	202,43	255,23	236,99	267,11	229,28	256,83	326,27	282,55	273,15	318,93
	Camisetas Sublimadas (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	119,26	99,52	109,83	112,69	119,79	117,11	107,50	112,69	117,65	149,92	146,93	131,41
		Máq. 2	119,26	100,16	109,83	112,69	119,79	117,11	106,90	112,12	117,11	149,92	146,93	131,41
	Corte	Máq. 3	119,26	99,52	109,83	112,69	119,79	117,11	106,90	112,12	117,11	149,92	146,93	131,41
		Máq. 4	119,26	100,16	109,83	112,69	119,79	117,11	107,50	112,69	117,65	149,92	146,93	131,41
	Sublimado	Máq. 5	168,65	141,20	155,33	159,36	169,41	165,62	151,61	158,96	166,00	212,02	207,78	185,85
	Confección	Máq. 6	74,75	62,74	69,47	71,27	75,59	73,89	67,61	71,27	73,89	94,95	92,92	82,81
		Máq. 7	75,59	63,75	69,47	71,27	75,59	73,89	68,54	70,37	73,89	94,95	92,92	82,81

		Máq. 8	75,59	63,75	69,47	71,27	75,59	73,89	67,61	71,27	74,75	94,28	92,92	82,81
		Máq. 9	75,59	62,74	69,47	71,27	75,59	74,75	67,61	71,27	74,75	94,95	92,92	83,57
		Máq. 10	75,59	62,74	69,47	71,27	76,43	73,89	67,61	71,27	73,89	94,95	92,92	83,57
	Planchado	Máq. 11	168,65	141,20	155,33	159,36	169,41	165,62	151,61	158,96	166,00	212,02	207,78	185,85
	Camisetas Tipo Polo (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	105,29	80,71	130,49	121,42	134,80	118,56	118,08	129,61	101,98	110,58	94,42	139,39
		Máq. 2	105,29	81,42	130,49	121,89	134,80	118,08	117,59	129,61	101,42	110,06	93,81	139,39
	Corte	Máq. 3	105,29	80,71	130,49	121,42	134,80	118,08	117,59	129,61	101,42	110,06	93,81	139,39
		Máq. 4	105,29	81,42	130,49	121,89	134,80	118,56	118,08	129,61	101,98	110,58	94,42	139,39
	Sublimado	Máq. 5	148,90	114,64	184,55	172,05	190,64	167,33	166,65	183,30	143,83	156,02	133,10	197,12
	Confección	Máq. 6	66,76	51,27	82,11	76,35	84,85	74,83	74,07	82,11	65,03	70,10	59,52	88,16
		Máq. 7	66,76	51,27	82,11	77,09	84,85	74,83	74,83	82,11	64,14	70,10	59,52	88,16
		Máq. 8	66,76	51,27	82,81	77,09	85,52	74,83	74,07	82,11	64,14	69,28	59,52	88,16
		Máq. 9	66,76	51,27	82,81	77,09	85,52	74,83	74,83	81,42	64,14	69,28	59,52	88,16
		Máq. 10	65,90	51,27	82,81	77,09	85,52	74,83	74,83	82,11	64,14	69,28	59,52	88,16
	Planchado	Máq. 11	148,90	114,64	184,55	172,05	190,64	167,33	166,65	183,30	143,83	156,02	133,10	197,12

Fuente: Autor

La cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r , en el período p (MPS_{kpr}) se la extrajo del MPS proporcionado por la empresa de caso de estudio como se muestra en el **Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10**.

Tabla 11: Cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r , en el período p .

MPS _{kpr}	Uniformes Sublimados (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	75	50	75	50	75	50	76	50	76	50	76	50
		Máq. 2	76	50	76	50	76	50	75	50	75	50	75	50
	Corte	Máq. 3	75	50	75	50	75	50	76	50	76	50	76	50
		Máq. 4	76	50	76	50	76	50	75	50	75	50	75	50
	Sublimado	Máq. 5	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100
	Confección	Máq. 6	30	20	30	20	30	20	30	20	31	20	30	20
		Máq. 7	30	20	30	20	30	20	31	20	30	20	30	20
		Máq. 8	30	20	30	20	31	20	30	20	30	20	30	20
		Máq. 9	30	20	31	20	30	20	30	20	30	20	30	20

		Máq. 10	31	20	30	20	30	20	30	20	30	20	31	20
	Planchado	Máq. 11	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100
Camisetas Sport (unidades)														
Proceso	Recurso		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Diseño	Máq. 1		251	191	251	191	251	191	252	191	252	191	252	191
	Máq. 2		252	191	252	191	252	191	251	191	251	191	251	191
Corte	Máq. 3		251	191	251	191	251	191	252	191	252	191	252	191
	Máq. 4		252	191	252	191	252	191	251	191	251	191	251	191
Sublimado	Máq. 5		503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382
Confección	Máq. 6		100	76	101	77	101	77	101	77	100	76	100	76
	Máq. 7		100	76	100	76	101	77	101	77	101	77	100	76
	Máq. 8		101	77	100	76	100	76	101	77	101	77	101	77
	Máq. 9		101	77	101	77	100	76	100	76	101	77	101	77
	Máq. 10		101	77	101	77	101	77	100	76	100	76	101	77
Planchado	Máq. 11		503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382
Camisetas Sublimadas (unidades)														
Proceso	Recurso		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Diseño	Máq. 1		109	124	109	124	109	124	109	125	109	125	109	125
	Máq. 2		109	125	109	125	109	125	109	124	109	124	109	124
Corte	Máq. 3		109	124	109	124	109	124	109	125	109	125	109	125
	Máq. 4		109	125	109	125	109	125	109	124	109	124	109	124
Sublimado	Máq. 5		218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249
Confección	Máq. 6		43	49	44	50	44	50	44	50	43	50	43	49
	Máq. 7		43	50	43	49	44	50	44	50	44	50	43	50
	Máq. 8		44	50	43	50	43	49	44	50	44	50	44	50
	Máq. 9		44	50	44	50	43	50	43	49	44	50	44	50
	Máq. 10		44	50	44	50	44	50	43	50	43	49	44	50
Planchado	Máq. 11		218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249
Camisetas Tipo Polo (unidades)														
Proceso	Recurso		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Diseño	Máq. 1		142	158	142	158	142	158	143	158	143	158	143	158
	Máq. 2		143	158	143	158	143	158	142	158	142	158	142	158
Corte	Máq. 3		142	158	142	158	142	158	143	158	143	158	143	158
	Máq. 4		143	158	143	158	143	158	142	158	142	158	142	158
Sublimado	Máq. 5		285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316
Confección	Máq. 6		57	63	57	64	57	63	57	63	57	63	57	63
	Máq. 7		57	63	57	63	57	64	57	63	57	63	57	63
	Máq. 8		57	63	57	63	57	63	57	64	57	63	57	63
	Máq. 9		57	63	57	63	57	63	57	63	57	64	57	63
	Máq. 10		57	64	57	63	57	63	57	63	57	63	57	64
Planchado	Máq. 11		285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316

Fuente: Autor

La cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r , en el período p ; (considerando todos los recursos disponibles r) ($MPST_{kp}$) se la obtuvo del MPS de cada SKU que proporcionó la empresa de caso de estudio como se indica en el *Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10*.

Tabla 12: Cantidad total a fabricar del producto k en el recurso r , en el período p .

MPST _{kp}	Uniformes Sublimados (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	75	50	75	50	75	50	76	50	76	50	76	50
		Máq. 2	76	50	76	50	76	50	75	50	75	50	75	50
	Corte	Máq. 3	75	50	75	50	75	50	76	50	76	50	76	50
		Máq. 4	76	50	76	50	76	50	75	50	75	50	75	50
	Sublimado	Máq. 5	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100
	Confección	Máq. 6	30	20	30	20	30	20	30	20	31	20	30	20
		Máq. 7	30	20	30	20	30	20	31	20	30	20	30	20
		Máq. 8	30	20	30	20	31	20	30	20	30	20	30	20
		Máq. 9	30	20	31	20	30	20	30	20	30	20	30	20
		Máq. 10	31	20	30	20	30	20	30	20	30	20	31	20
	Planchado	Máq. 11	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100
	Camisetas Sport (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	251	191	251	191	251	191	252	191	252	191	252	191
		Máq. 2	252	191	252	191	252	191	251	191	251	191	251	191
	Corte	Máq. 3	251	191	251	191	251	191	252	191	252	191	252	191
		Máq. 4	252	191	252	191	252	191	251	191	251	191	251	191
	Sublimado	Máq. 5	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382
	Confección	Máq. 6	100	76	101	77	101	77	101	77	100	76	100	76
		Máq. 7	100	76	100	76	101	77	101	77	101	77	100	76
		Máq. 8	101	77	100	76	100	76	101	77	101	77	101	77
		Máq. 9	101	77	101	77	100	76	100	76	101	77	101	77
		Máq. 10	101	77	101	77	101	77	100	76	100	76	101	77
	Planchado	Máq. 11	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382
	Camisetas Sublimadas (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	109	124	109	124	109	124	109	125	109	125	109	125
		Máq. 2	109	125	109	125	109	125	109	124	109	124	109	124
	Corte	Máq. 3	109	124	109	124	109	124	109	125	109	125	109	125

		Máq. 4	109	125	109	125	109	125	109	124	109	124	109	124
	Sublimado	Máq. 5	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249
	Confección	Máq. 6	43	49	44	50	44	50	44	50	43	50	43	49
		Máq. 7	43	50	43	49	44	50	44	50	44	50	43	50
		Máq. 8	44	50	43	50	43	49	44	50	44	50	44	50
		Máq. 9	44	50	44	50	43	50	43	49	44	50	44	50
		Máq. 10	44	50	44	50	44	50	43	50	43	49	44	50
	Planchado	Máq. 11	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249
	Camisetas Tipo Polo (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	142	158	142	158	142	158	143	158	143	158	143	158
		Máq. 2	143	158	143	158	143	158	142	158	142	158	142	158
	Corte	Máq. 3	142	158	142	158	142	158	143	158	143	158	143	158
		Máq. 4	143	158	143	158	143	158	142	158	142	158	142	158
	Sublimado	Máq. 5	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316
	Confección	Máq. 6	57	63	57	64	57	63	57	63	57	63	57	63
		Máq. 7	57	63	57	63	57	64	57	63	57	63	57	63
		Máq. 8	57	63	57	63	57	63	57	64	57	63	57	63
		Máq. 9	57	63	57	63	57	63	57	63	57	64	57	63
		Máq. 10	57	64	57	63	57	63	57	63	57	63	57	64
	Planchado	Máq. 11	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316

El nivel de inventario inicial del producto k en el período p (BI_{kp}) se lo obtuvo del plan agregado que la empresa del caso de estudio proporcionó como se muestra en el **Anexo 4** y **Anexo 5**.

Tabla 13: Nivel de inventario inicial del producto k en el período p .

BI_{kp}	Uniformes Sublimados (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	26	0	0	0	32	0	0	67	77	77	38
	Camisetas Sport (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Camisetas Sublimadas (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Camisetas Tipo Polo (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

La capacidad utilizada del recurso r en el período p (CUH_{rp}) se la calculó por medio de la fórmula de índice de carga en la cual se toma en cuenta el fondo de tiempo real con las necesidades calculadas de maquinaria las cuales fueron obtenidas del **Anexo 6**.

Tabla 14: Capacidad utilizada del recurso r en el período p .

CUH _{rp}	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Máq. 2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Corte	Máq. 3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Máq. 4	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Sublimado	Máq. 5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Confección	Máq. 6	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Máq. 7	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Máq. 8	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Máq. 9	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Máq. 10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Planchado	Máq. 11	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Autor

La tasa porcentual obtenida a partir de la relación del número de horas consumidas del recurso r en el período p , y el número disponible de horas al mismo recurso y período (CUP_{rp}) se lo calculó mediante la fórmula del fondo de tiempo real la cual toma en cuenta los días del año, los días sábados, días domingos y días feriados que tiene un año, además del número de turnos que tiene la empresa.

Tabla 15: Tasa porcentual obtenida a partir de la relación del número de horas consumidas del recurso r en el período p , y el número disponible de horas al mismo recurso y período.

CUP _{rp}	Proceso	Recurso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
	Diseño	Máq. 1	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
		Máq. 2	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
	Corte	Máq. 3	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
		Máq. 4	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
	Sublimado	Máq. 5	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
	Confección	Máq. 6	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
		Máq. 7	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
		Máq. 8	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
		Máq. 9	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
		Máq. 10	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494	1494
	Planchado	Máq. 11	498	498	498	498	498	498	498	498	498	498	498	498

Fuente: Autor

Los recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período p (GR_{kp}) se los obtuvo a través de la demanda de los SKU's del año 2017 como indica el **Anexo 2**.

Tabla 16: Recursos necesarios en cifras brutas para el producto k en el período p .

GR _{kp}	Uniformes Sublimados (unidades)					
	Enero	89	Mayo	140	Septiembre	142
	Febrero	208	Junio	283	Octubre	161
	Marzo	273	Julio	231	Noviembre	192
	Abril	213	Agosto	83	Diciembre	88
	Camisetas Sport (unidades)					
	Enero	526	Mayo	344	Septiembre	652
	Febrero	272	Junio	437	Octubre	489
	Marzo	251	Julio	322	Noviembre	457
	Abril	399	Agosto	404	Diciembre	623
	Camisetas Sublimadas (unidades)					

	Enero	224	Mayo	226	Septiembre	217
	Febrero	157	Junio	216	Octubre	354
	Marzo	190	Julio	181	Noviembre	340
	Abril	200	Agosto	199	Diciembre	272
	Camisetas Tipo Polo (unidades)					
	Enero	194	Mayo	318	Septiembre	181
	Febrero	115	Junio	245	Octubre	213
	Marzo	298	Julio	243	Noviembre	155
	Abril	259	Agosto	294	Diciembre	340

Fuente: Autor

El total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p (RM_{kp}) se lo calculó mediante una diferencia de la cantidad de demanda pronosticada y la cantidad producida como se indica en el *Anexo 11*.

Tabla 17: Total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p .

RM_{kp}	Uniformes Sublimados (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	89	0	0	0	140	0	0	83	142	0	0	88
	Camisetas Sport (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	526	272	399	251	344	437	322	404	652	489	457	623
	Camisetas Sublimadas (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	157	190	0	226	0	181	0	0	0	340	0
	Camisetas Tipo Polo (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

El total de necesidades satisfechas para el producto k en el período p , en el recurso r (RM_{kpr}) se las obtuvo a través de una división de la demanda cumplida para el número de maquinarias existentes en la empresa.

Tabla 18: Total de necesidades satisfechas para el producto *k* en el período *p*, en el recurso *r*.

	Uniformes Sublimados (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RMkpr	Diseño	Máq 1	44	0	0	0	70	0	0	42	71	0	0	44
		Máq 2	45	0	0	0	70	0	0	41	71	0	0	44
	Corte	Máq 3	44	0	0	0	70	0	0	42	71	0	0	44
		Máq 4	45	0	0	0	70	0	0	41	71	0	0	44
	Sublimado	Máq 5	89	0	0	0	140	0	0	83	142	0	0	88
	Confección	Máq 6	17	0	0	0	28	0	0	16	17	0	0	18
		Máq 7	18	0	0	0	28	0	0	16	17	0	0	17
		Máq 8	18	0	0	0	28	0	0	17	17	0	0	17
		Máq 9	18	0	0	0	28	0	0	17	16	0	0	18
		Máq 10	18	0	0	0	28	0	0	17	16	0	0	18
	Planchado	Máq 11	89	0	0	0	140	0	0	83	142	0	0	88
	Camisetas Sport (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Máq 1	263	136	199	125	172	218	161	202	326	245	229	312
		Máq 2	263	136	200	126	172	219	161	202	326	244	228	311
	Corte	Máq 3	263	136	199	125	172	218	161	202	326	245	229	312
		Máq 4	263	136	200	126	172	219	161	202	326	244	228	311
	Sublimado	Máq 5	526	272	399	251	344	437	322	404	652	489	457	623
	Confección	Máq 6	105	55	79	50	69	88	64	80	130	98	91	125
		Máq 7	105	55	80	50	68	87	65	80	130	98	91	125
		Máq 8	105	54	80	51	69	87	64	80	130	98	92	125
		Máq 9	105	54	80	50	69	87	65	81	131	97	92	124
		Máq 10	106	54	80	50	69	88	64	80	131	98	91	124
	Planchado	Máq 11	526	272	399	251	344	437	322	404	652	489	457	623
	Camisetas Sublimadas (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Máq 1	0	78	95	0	113	0	91	0	0	0	170	0
		Máq 2	0	79	95	0	113	0	99	0	0	0	170	0
	Corte	Máq 3	0	78	95	0	113	0	91	0	0	0	170	0
		Máq 4	0	79	95	0	113	0	90	0	0	0	170	0
	Sublimado	Máq 5	0	157	190	0	226	0	181	0	0	0	340	0
	Confección	Máq 6	0	32	38	0	45	0	36	0	0	0	68	0
		Máq 7	0	32	38	0	45	0	37	0	0	0	68	0
		Máq 8	0	31	38	0	45	0	36	0	0	0	68	0
		Máq 9	0	31	38	0	45	0	36	0	0	0	68	0
		Máq 10	0	31	38	0	46	0	36	0	0	0	68	0

	Planchado	Máq 11	0	157	190	0	226	0	181	0	0	0	340	0
	Camisetas Tipo Polo (unidades)													
	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Máq 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Máq 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Corte	Máq 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Máq 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sublimado	Máq 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Confección	Máq 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Máq 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Máq 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Máq 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Máq 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Planchado	Máq 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

Según (Heizer & Render, 2016) menciona que la retención de pedidos (back ordering) durante los periodos de alta demanda con aquellos pedidos retenidos son pedidos de bienes o servicios que una empresa acepta, pero que es incapaz de satisfacer en el momento (a propósito o por casualidad). Esta estrategia únicamente es viable si los clientes están dispuestos a esperar, sin que ello suponga pérdida de prestigio para nuestra empresa, o no cancelan su pedido. Muchas empresas retienen pedidos, pero a menudo la consecuencia es la pérdida de ventas.

Los requisitos no cumplidos para el producto k en el período p (RNM_{kp}) se calculó con la diferencia del pronóstico de la demanda planificada con la demanda producida como se indica en el *Anexo 11*.

Tabla 19: Requisitos no cumplidos para el producto k en el período p .

RNM_{kp}	Uniformes Sublimados (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	108	122	113	0	183	80	0	0	61	41	0
	Camisetas Sport (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Camisetas Sublimadas (unidades)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
23	0	0	17	0	55	0	22	149	107	0	241
Camisetas Tipo Polo (unidades)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
279	225	313	182	277	166	322	183	286	28	163	110

Fuente: Autor

El nivel de servicio, relación de los requisitos cumplidos, RM_{kp} , y las necesidades brutas del producto k en el período p (SL_{kp}) se calculó mediante la fórmula del nivel de servicio como se indica a continuación:

$$NS = \prod \left(1 - \frac{\sum Fallos}{\sum Planificado} \right)$$

$$NS = \prod \left(1 - \frac{RNM_{kp}}{MPS_{kpr}} \right)$$

$$NS = \prod \left(1 - \frac{3856}{13224} \right)$$

$$NS = 70,84\%$$

El nivel medio de inventario generado para el producto k en el período p (AIL_{kp}) se obtuvo de la cantidad producida en exceso como se muestra en el **Anexo 12**.

Tabla 20: Nivel medio de inventario generado para el producto k en el período p .

AIL _{kp}	Uniformes Sublimados (unidades)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Juni	Juli	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
	62	0	0	0	11	0	0	17	9	0	0	12
	Camisetas Sport (unidades)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Juni	Juli	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
	375	172	100	299	193	337	171	304	501	389	306	523
	Camisetas Sublimadas (unidades)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Juni	Juli	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
	0	110	252	0	159	0	181	0	0	0	46	0
	Camisetas Tipo Polo (unidades)											

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Juni	Juli	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

3.5 Optimización del Plan Maestro de Producción (MPS) con Algoritmo Genético (AG)

Los algoritmos realizan la selección natural sobre el espacio de soluciones del problema a solucionar. Se fundamentan en la creación de generaciones sucesivas de individuos representativos de posibles soluciones al problema. El código de una solución se interpreta como el cromosoma del individuo compuesto de un cierto número de genes a los que les corresponden ciertos cromosomas. La codificación más común de los cromosomas que conforman las soluciones es a través de cadenas binarias, aunque se han utilizado también números reales y letras. Una función de aptitud (*fitness function*) debe ser generada para cada problema de manera específica. Esta debe ser capaz de “castigar” a las malas soluciones y de “premiar” a las buenas, de forma que a las buenas soluciones sean las que se propaguen con mayor rapidez. La selección de padres se realiza al azar usando un método que favorezca a los individuos mejor adaptados, ya que puede ser seleccionado debido a que es proporcional a su función de aptitud. Para esto se consideran: el cruzamiento y la mutación, a partir de los cuales se obtienen nuevos individuos (Marquéz-Delgado, Ávila-Rondón, & Gomez, 2012).

Para estimar AIL_{max} , RNM_{max} , y BSS_{max} , se necesita un paso de pre-procesamiento (primera fase o período de calentamiento) (Vieira, Soares, & Gaspar, 2003). Durante esta fase el AG funciona mediante su lógica general, sin embargo, con altas tasas de mutación y de cruce para generar los máximos valores posibles que se pueden encontrar durante la ejecución real del AG (segunda fase). Esto es, una estimación de los valores máximos y, se puede encontrar un valor mayor durante la ejecución real del AG. Si esto ocurre, se actualizan los valores máximos correspondientes (Soares & Vieira, 2009).

El algoritmo genético se compone de una serie de pasos que se muestran a continuación los cuales ayudan al correcto desarrollo del AG:

- **Población Inicial:** se inició con un conjunto de cromosomas generados aleatoriamente los cuales van mejorando mediante los operadores genéticos, la población inicial del MPS son valores aleatorios de los productos que producirá cada máquina en cada mes en el cual para nuestro caso se eligió una población de 150.
- **Evaluación:** Durante las sucesivas iteraciones (generaciones) de cromosomas, se evalúa la adecuación de los cromosomas como soluciones óptimas, una vez realizada esta evaluación se forma una nueva población de cromosomas mediante el proceso de selección y operadores genéticos.
- **Selección:** Dependiendo de las características de la población, como por ejemplo los individuos con niveles similares de aptitud física, el método utilizado para seleccionar a los individuos, a los cuales se los cruzará y mutará, puede afectar los resultados y el rendimiento del algoritmo. La técnica más utilizada de selección se llama ruleta. (Soares & Vieira, 2009).

Existen varios métodos de selección como:

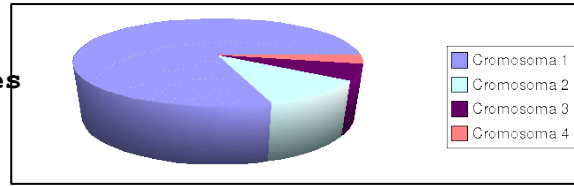
- **Elitista:** garantiza la selección de los cromosomas más aptos para la generación.
- **Ruleta:** Según (Rezende, 2003), la ruleta es el método de selección más simple y más utilizado. En este método, se simula una rueda de ruleta, similar a las utilizadas en los juegos de azar, donde cada individuo toma una parte de la ruleta de acuerdo con su valor de aptitud. Por lo cual, los individuos más aptos son representados por partes más grandes y tienen mayor probabilidad de ser elegidos para un posible cruce.

Según (Back, 1996), un pseudo-código para el método de la ruleta es el siguiente:

```

1.  $n \leftarrow 1$ ;
2.  $\text{Cifra} \leftarrow \text{Psel}(n)$ ;
3.  $\text{muestra } u \sim U(0,1)$ ;
4. Mientras  $\text{cifra} < u$  entonces
5.    $n \leftarrow (n+1)$ 
6.    $\text{cifra} \leftarrow \text{cifra} + \text{Psel}(n)$ ;
7. Fin
8. Regresa  $n$ 

```



- **Escalada:** es método se utiliza cuando todos los cromosomas son aptos y se diferencian por pequeñas cosas.
- **Por torneo:** se eligen subgrupos de cromosomas de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos, sólo se elige a un cromosoma de cada subgrupo para la reproducción, además el método de torneo, en cada ciclo de selección, selecciona un número de individuos k (con la misma probabilidad de que todos los individuos de la población sean elegidos). El mejor individuo del grupo k pasa a la siguiente fase (Michalewicz, 1996). Este ciclo se repite hasta que la población esté completa.

El pseudo-código para este método es el siguiente (Back, 1996):

```

1.  $\text{TamañoDe}(P(T')) \leftarrow 0$ 
2. Para  $i \leftarrow 1$  a  $\text{TamañoDe}(P(t))$  entonces
3.    $K \leftarrow$  muestra aleatoria de  $nk$  individuos de  $P(t)$ 
4.    $bI \leftarrow$  Mejor individuo de  $k$ 
5.    $P(t)' \leftarrow P(t)' + bI$ 
6. Fin para
7. Regresa  $P(t)'$ 

```

- **Cruce:** este operador realiza la función de compartir información entre los cromosomas padres para crear cromosomas hijos como se muestra a continuación:

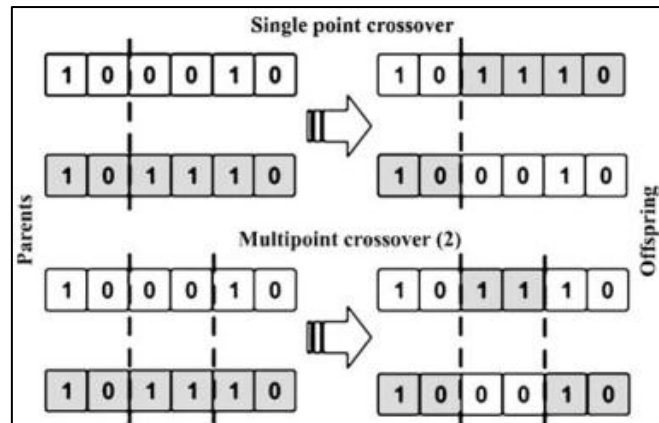


Figura 7: Operación de Cruce

Fuente: “A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems based on genetic algorithm” (Soares & Vieira, 2009)

- **Mutación:** este operador altera uno o más genes de un cromosoma para así tener una población con variada estructura. La función principal de este operador es obtener el material genético perdido o el material genético no tomado en cuenta.

Para realizar correctamente la optimización del MPS con el Algoritmo Genético se debe seguir una serie de pasos como se muestra en la **Figura 10**.

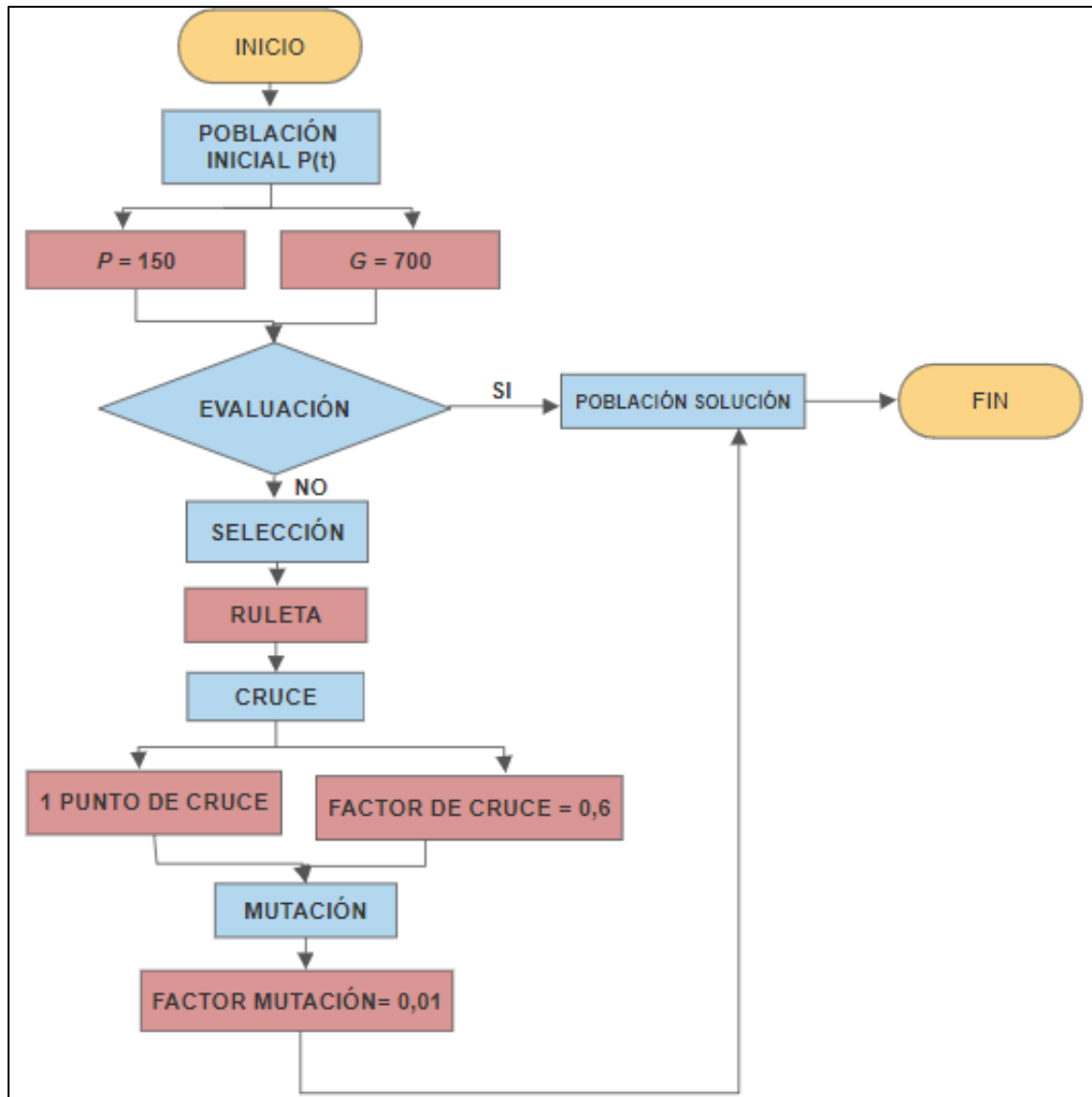


Figura 8: Flujograma del Algoritmo Genético aplicado al MPS

Fuente: Autor

Al utilizar el Algoritmo Genético para optimizar problemas del MPS es necesario tener en cuenta una serie de parámetros necesarios para el AG, los cuales nos serán de gran ayuda para el correcto desarrollo del mismo, (Soares & Vieira, 2009) quienes realizaron una investigación de la optimización del MPS mediante la aplicación de AG para cualquier tipo de empresa, (Soares & Vieira, 2009) sugieren los siguientes parámetros de configuración del AG:

- Tamaño de Población: ≥ 100

- Tasa de Cruce: $0,6 \leq P_c \leq 0,99$
- Tasa de Mutación: $0,001 \leq P_m \leq 0,01$
- Criterios de Parada: Basado en el método de convergencia propuesto
- ¿Estrategia de Elitismo?: Sí, manteniendo sólo al mejor individuo de la generación actual
- Método de Cruce: 2 puntos
- Método de Selección: Ruleta o Torneo usando grupos de tres puntos
- Controlar la diversidad de la población: No se necesita para problemas de MPS.
- Método Aplicado a la Generación de la Población Inicial: Heurística

Heurística: Se llenan los valores de los genes secuencialmente con la mayor diversidad posible, siempre respetando la limitación de tamaño de lote de producción estándar. Considerando la posibilidad de situación hipotética en la necesidad bruta máxima de un producto determinado en un período de tiempo determinado (retícula de período) es de 2.500 unidades, el tamaño de lote estándar es de 500 unidades, y hay cuatro los posibles recursos productivos disponibles para hacer que el producto, los genes para el primer individuo en la población en el primer período sería "{0; 500; 1,000; 1,500}". El segundo individuo tendría "2.000; 2.500; 0; 500}", y así sucesivamente para todos los individuos de la población (Soares & Vieira, 2009).

Una vez tomado en cuenta estos parámetros sugeridos, se procede a realizar la optimización de MPS para la empresa textil del Caso de estudio la cual se la realizo para mejorar aspectos puntuales los cuales se los detalla más adelante, los parámetros utilizados del AG, en el modelo para encontrar el mejor rendimiento de la empresa son:

- Tamaño de población: ≥ 150
- Número de generaciones: 700

- Método de selección: Ruleta
- Método de cruzamiento: 1 punto de cruce
- Factor de cruzamiento: 0.6
- Factor de mutación: 0.01
- Elitismo: Habilitado

3.5.1 Pronóstico de la Demanda

Para realizar el nuevo MPS se realizó el pronóstico de la demanda del año 2018, mediante Redes Neuronales Artificiales (RNA) el cual ayudará para la posterior realización del MPS.

Tabla 21: *Pronostico de la demanda 2018*

PRONÓSTICO 2018				
	Uniformes Sublimados	Camisetas Sport	Camisetas Sublimadas	Camisetas Tipo Polo
Enero	86	427	191	194
Febrero	212	341	193	116
Marzo	268	323	196	298
Abril	232	328	202	347
Mayo	174	342	219	289
Junio	240	366	211	248
Julio	218	401	229	231
Agosto	157	447	172	221
Septiembre	131	490	215	209
Octubre	123	487	353	186
Noviembre	121	438	328	171
Diciembre	120	563	276	345

Fuente: Autor

Se puede evidenciar con claridad el comportamiento del pronóstico de la demanda en relación a los años anteriores.

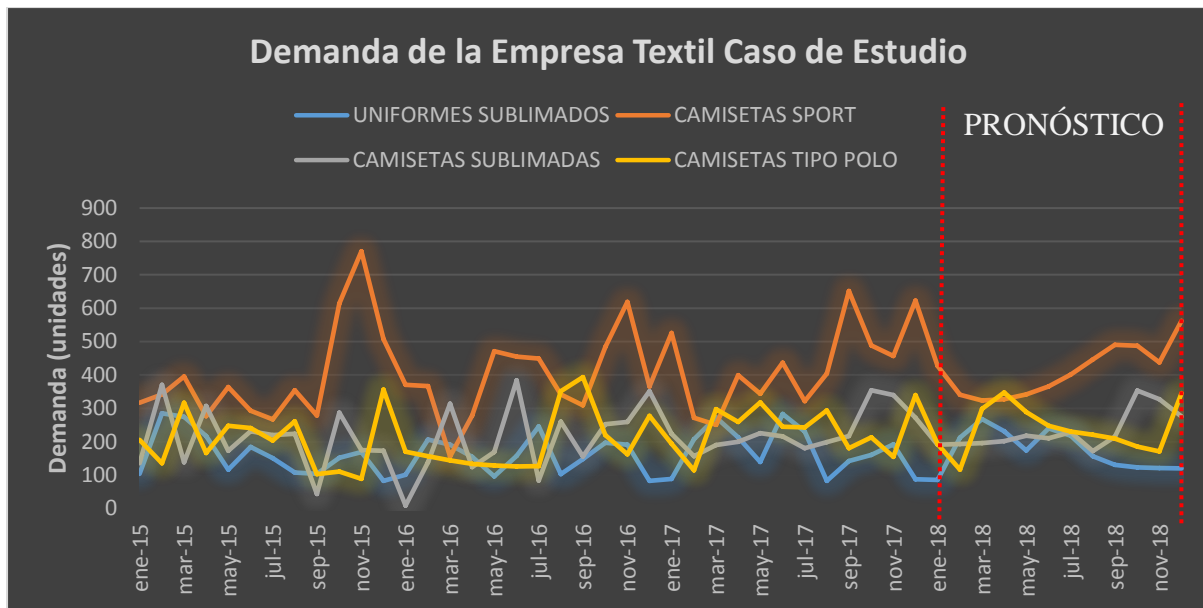


Figura 9: Demanda y pronóstico de la demanda

Fuente: Autor

Para la realización del pronóstico de la demanda del año 2018 se tomó como referencia los valores de la demanda de los años 2015, 2016 y 2017 de la empresa textil caso de estudio.

Ver Anexo 2.

3.6 Resultados del Plan Maestro de Producción (MPS) Optimizado.

La solución del MPS mediante 1 algoritmo genético se lo realizo en una computadora de marca HP, con un procesador Intel(R) CORE(TM) i5-4210U, de memoria RAM de 8 GB, con 2,40 GHz de velocidad, lo cual hizo que al momento de utilizar el algoritmo genético fluctua entre 3 minutos y 5,22 minutos en procesar dicho algoritmo.

Una vez comprendido el comportamiento del Algoritmo Genético y obtenido el pronóstico de la demanda 2018 se procedió a optimizar el MPS como se muestra en la **Tabla 22**, dicho MPS mejorará la situación productiva de la empresa textil del caso de estudio.

Tabla 22: Plan Maestro de Producción Optimizado Mediante Algoritmo Genético

MPS OPTIMIZADO				
	Uniformes Sublimados	Camisetas Sport	Camisetas Sublimadas	Camisetas Tipo Polo

Enero	89	526	224	196
Febrero	212	341	193	116
Marzo	273	323	196	300
Abril	232	399	202	347
Mayo	174	344	226	318
Junio	283	437	216	248
Julio	231	401	229	243
Agosto	157	447	199	294
Septiembre	142	652	217	209
Octubre	161	489	354	213
Noviembre	192	457	340	171
Diciembre	120	623	276	345

Fuente: Autor

Después de haber obtenido los valores correspondientes para cada mes del MPS optimizado, se procedió a realizar una simulación de los resultados del MPS con Algoritmo Genético, en la cual se plasmaron los resultados en una matriz, la cual detalla específicamente cuanto será la producción de cada uno de los SKU's por cada maquinaria existente en la empresa, debido a que las maquinarias cumplen un proceso continuo de producción la simulación se la realizó de tal manera que el número total de productos a fabricar sea dividido entre el número de maquinarias existentes dentro de cada proceso como se muestra a continuación:

Tabla 23: Plan Maestro de Producción (MPS) Optimizado.

MPS OPTIMIZADO														
Uniformes Sublimados (unidades)	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Máquina 1	44	106	136	116	87	141	115	79	71	81	96	60
		Máquina 2	45	106	137	116	87	142	116	78	71	80	96	60
	TOTAL		89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120
	Corte	Máquina 3	44	106	136	116	87	141	115	79	71	81	96	60
		Máquina 4	45	106	137	116	87	142	116	78	71	80	96	60
	TOTAL		89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120
	Sublimado	Máquina 5	89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120

	TOTAL		89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120
	Confección	Máquina 6	17	42	54	46	34	56	46	32	28	33	38	24
		Máquina 7	18	42	55	47	35	56	47	32	28	32	38	24
		Máquina 8	18	43	55	47	35	57	46	31	28	32	39	24
		Máquina 9	18	43	55	46	35	57	46	31	29	32	39	24
		Máquina 10	18	42	54	46	35	57	46	31	29	32	38	24
	TOTAL		89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120
	Planchado	Máquina 11	89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120
	TOTAL		89	212	273	232	174	283	231	157	142	161	192	120
Camisetas Sport (unidades)	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Máquina 1	263	171	161	199	172	219	200	224	326	244	228	311
		Máquina 2	263	170	162	200	172	218	201	223	326	245	229	312
	TOTAL		526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
	Corte	Máquina 3	263	171	161	199	172	219	200	224	326	244	229	311
		Máquina 4	263	170	162	200	172	218	201	223	326	245	228	312
	TOTAL		526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
	Sublimado	Máquina 5	526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
	TOTAL		526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
	Confección	Máquina 6	105	68	64	80	69	88	80	90	130	98	91	124
		Máquina 7	106	69	64	80	69	88	80	90	130	98	91	124
		Máquina 8	105	68	65	80	69	87	81	89	130	98	91	125
		Máquina 9	105	68	65	80	68	87	80	89	131	98	92	125
		Máquina 10	105	68	65	79	69	87	80	89	131	97	92	125
	TOTAL		526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
	Planchado	Máquina 11	526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
	TOTAL		526	341	323	399	344	437	401	447	652	489	457	623
Camisetas Sublimadas (unidades)	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Maquina 1	112	97	98	101	113	108	114	100	108	177	170	138
		Maquina 2	112	96	98	101	113	108	115	99	109	177	170	138
	TOTAL		224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
	Corte	Máquina 3	112	97	98	101	113	108	114	100	108	177	170	138
		Máquina 4	112	96	98	101	113	108	115	99	109	177	170	138

	TOTAL		224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
	Sublimado	Máquina 5	224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
	TOTAL		224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
	Confección	Máquina 6	44	38	39	40	45	43	45	40	43	71	68	55
		Máquina 7	45	38	39	41	45	44	46	40	43	71	68	56
		Máquina 8	45	39	39	40	45	43	46	40	44	71	68	55
		Máquina 9	45	39	39	41	46	43	46	40	44	71	68	55
		Máquina 10	45	39	40	40	45	43	46	39	43	70	68	55
	TOTAL		224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
	Planchado	Máquina 11	224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
	TOTAL		224	193	196	202	226	216	229	199	217	354	340	276
Camisetas Tipo Polo (unidades)	Proceso	Recurso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Diseño	Máquina 1	98	58	150	173	159	124	121	147	104	107	85	173
		Máquina 2	98	58	150	174	159	124	122	147	105	106	86	172
	TOTAL		196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345
	Corte	Máquina 3	98	58	150	174	159	124	121	147	105	107	85	173
		Máquina 4	98	58	150	173	159	124	122	147	104	106	86	172
	TOTAL		196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345
	Sublimado	Máquina 5	196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345
	TOTAL		196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345
	Confección	Máquina 6	39	23	60	69	63	50	48	59	41	43	35	69
		Máquina 7	39	24	60	70	64	50	49	59	42	43	34	69
		Máquina 8	40	23	60	69	64	49	49	58	42	42	34	69
		Máquina 9	39	23	60	70	64	50	49	59	42	43	34	69
		Máquina 10	39	23	60	69	63	49	48	59	42	42	34	69
	TOTAL		196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345
	Planchado	Máquina 11	196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345
	TOTAL		196	116	300	347	318	248	243	294	209	213	171	345

Fuente: Autor

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Comparación entre MPS's

La empresa textil Caso de Estudio cuenta con un MPS el cual lo desarrollaron con métodos Clásicos, a partir de este MPS se procedió a optimizarlo mediante el Algoritmo Genético de tal manera que los resultados obtenidos sirvan para mejora de la empresa, los resultados que se muestran a continuación son del MPS actual y del MPS optimizado:

Tabla 24: *Plan Maestro de Producción Actual*

PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN				
	Uniformes Sublimados	Camisetas Sport	Camisetas Sublimadas	Camisetas Tipo Polo
Enero	151	503	218	285
Febrero	100	382	249	316
Marzo	151	503	218	285
Abril	100	382	249	316
Mayo	151	503	218	285
Junio	100	382	249	316
Julio	151	503	218	285
Agosto	100	382	249	316
Septiembre	151	503	218	285
Octubre	100	382	249	316
Noviembre	151	503	218	285
Diciembre	100	382	249	316

Fuente: Autor

Tabla 25: *Plan Maestro de Producción Optimizado Mediante Algoritmo Genético*

MPS OPTIMIZADO				
	Uniformes Sublimados	Camisetas Sport	Camisetas Sublimadas	Camisetas Tipo Polo
Enero	89	526	224	196
Febrero	212	341	193	116
Marzo	273	323	196	300
Abril	232	399	202	347
Mayo	174	344	226	318
Junio	283	437	216	248
Julio	231	401	229	243
Agosto	157	447	199	294
Septiembre	142	652	217	209

Octubre	161	489	354	213
Noviembre	192	457	340	171
Diciembre	120	623	276	345

Fuente: Autor

4.2 Aspectos Mejorados

En el MPS elaborado por la empresa Caso de Estudio realizaban una mala distribución de producción semanal, la cual era no uniforme *Ver Anexo 8, 9, 10*, la cual con la Optimización del MPS se logró estandarizar la producción semanal y así tener un mejor control de la misma

Tabla 26: Distribución de producción semanal actual

Producto:	Uniformes Sublimados	Política de pedido:				L*L			
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		23	24	23	24	34	34	34	34
Pedidos de los clientes		20	27	26	14	38	31	28	45
Cantidad en el MPS		23	27	26	24	38	34	34	45
Inicio del MPS	23	27	26	24	38	34	34	45	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

Tabla 27: Distribución de producción semanal estandarizado con Algoritmo Genético de Uniformes Sublimados.

Producto:	Uniformes Sublimados
-----------	----------------------

Cantidad disponible:	0								
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		39	39	40	39	33	33	32	33
Pedidos de los clientes		20	21	21	21	35	36	35	36
Cantidad en el MPS		39	39	40	39	35	36	35	36
Inicio del MPS	39	39	40	39	35	36	35	36	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

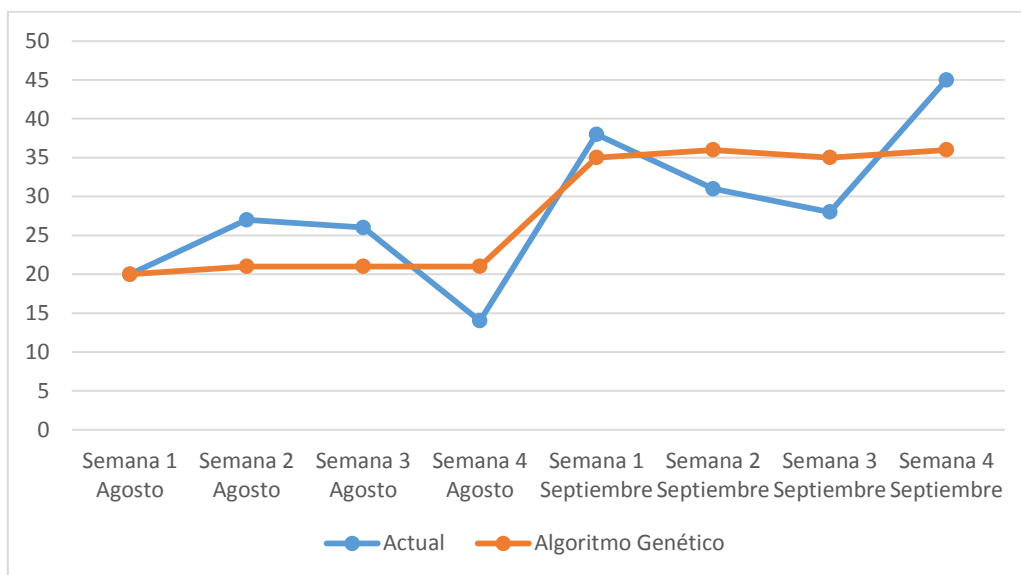


Figura 10: Comparación de la distribución de producción semanal de Uniformes Sublimados entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.

Fuente: Autor

Tabla 28: Distribución de producción semanal actual de Camisetas Sport

Producto:	Camiseta Sport	Política de pedido:	L*L
------------------	----------------	----------------------------	-----

Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		91	92	92	92	110	12 0	12 0	12 0
Pedidos de los clientes		85	102	97	76	118	11 2	14 5	 98
Cantidad en el MPS		91	102	97	92	118	12 0	14 5	12 0
Inicio del MPS	91	10 2	 97	 92	 118	 120	14 5	12 0	 0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

Tabla 29: Distribución de producción semanal estandarizado de Camisetas Sport

Producto:	Camisetas Sport								
Cantidad disponible:	0								
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		112	112	112	111	122	123	123	122
Pedidos de los clientes		101	101	101	101	163	163	163	163
Cantidad en el MPS		112	112	112	111	163	163	163	163
Inicio del MPS	112	112	112	111	163	163	163	163	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

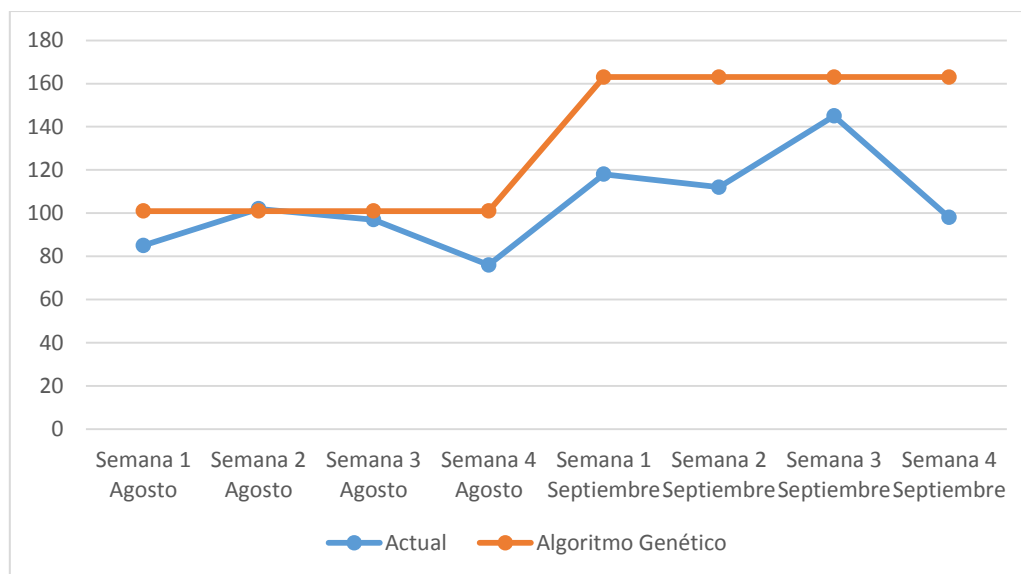


Figura 11: Comparación de la distribución de producción semanal de Camisetas Sport entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.

Fuente: Autor

Tabla 30: Distribución de producción semanal actual de Camisetas Sublimadas

Producto:	Camiseta Sublimada	Política de pedido:				L*L			
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		59	59	60	41	4	4	4	4
Pedidos de los clientes		65	49	65	56	53	6	5	4
Cantidad en el MPS		59	59	65	60	53	6	5	4
Inicio del MPS	65	9	65	60	53	68	5	4	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

Tabla 31: Distribución de producción semanal estandarizado de Camisetas Sublimadas

Producto:	Camisetas Sublimada								
Cantidad disponible:	0								
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		43	43	43	43	54	53	54	54
Pedidos de los clientes		50	50	49	50	54	54	55	54
Cantidad en el MPS		50	50	49	50	54	54	55	54
Inicio del MPS	50	50	49	50	54	54	55	54	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

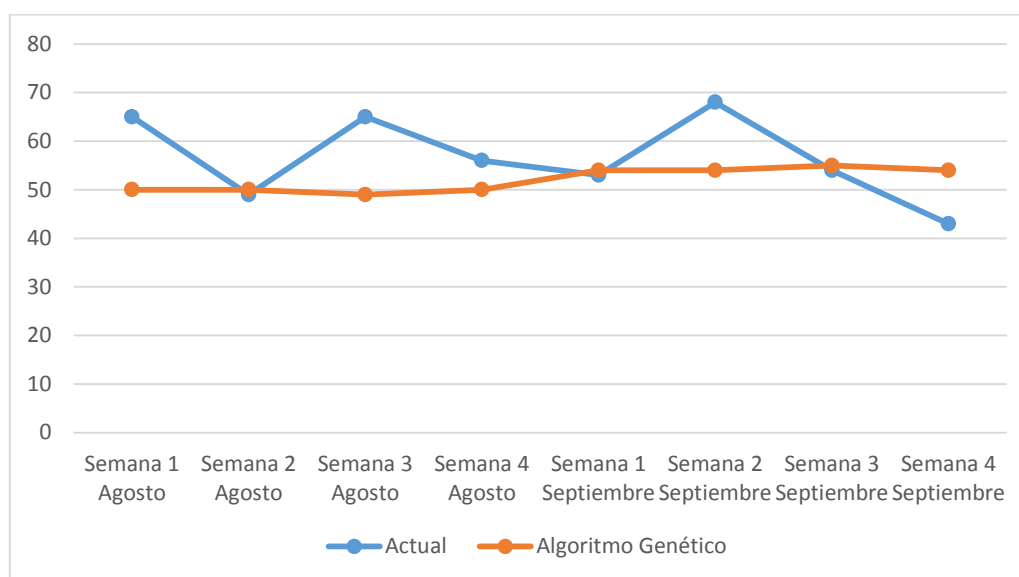


Figura 12: Comparación de la distribución de producción semanal de Camisetas Sublimadas entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.

Fuente: Autor

Tabla 32: Distribución de producción semanal actual de Camisetas Tipo Polo.

Producto:	Camiseta Tipo Polo	Política de pedido:				L*L			
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		7 6	75	76	75	65	6 5	6 6	6 6
Pedidos de los clientes		8 2	76	83	71	59	7 6	5 8	7 8
Cantidad en el MPS		8 2	76	83	75	65	7 6	6 6	7 8
Inicio del MPS	82	7 6	83	75	65	76	6 6	7 8	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

Tabla 33: Distribución de producción semanal estandarizado de Camisetas Tipo Polo

Producto:	Tipo Polo								
Cantidad disponible:	0								
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		55	55	56	55	52	53	52	52
Pedidos de los clientes		74	74	73	73	45	45	45	46
Cantidad en el MPS		74	74	73	73	52	53	52	52
Inicio del MPS	74	74	73	73	52	53	52	52	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible		0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

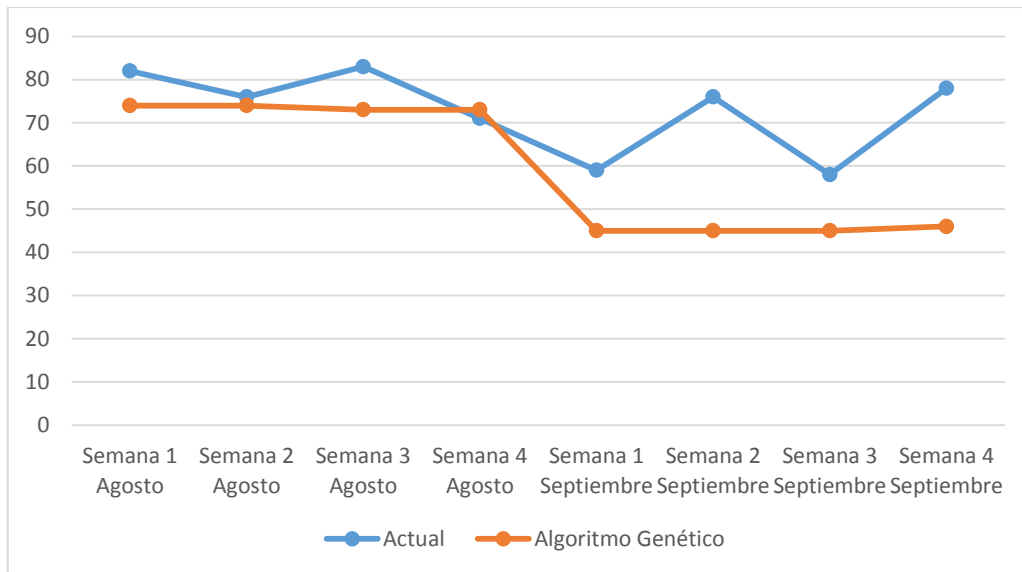


Figura 13: Comparación de la distribución de producción semanal de Camisetas Tipo Polo entre el Actual y el obtenido con Algoritmo Genético.

Fuente: Autor

Como indica la **Tabla 19** donde se muestra el número de requisitos no cumplidos para el producto k en el periodo p , al optimizar el MPS mediante el Algoritmo Genético disminuyeron en su totalidad y el nivel de servicio llegó al 96,3%.

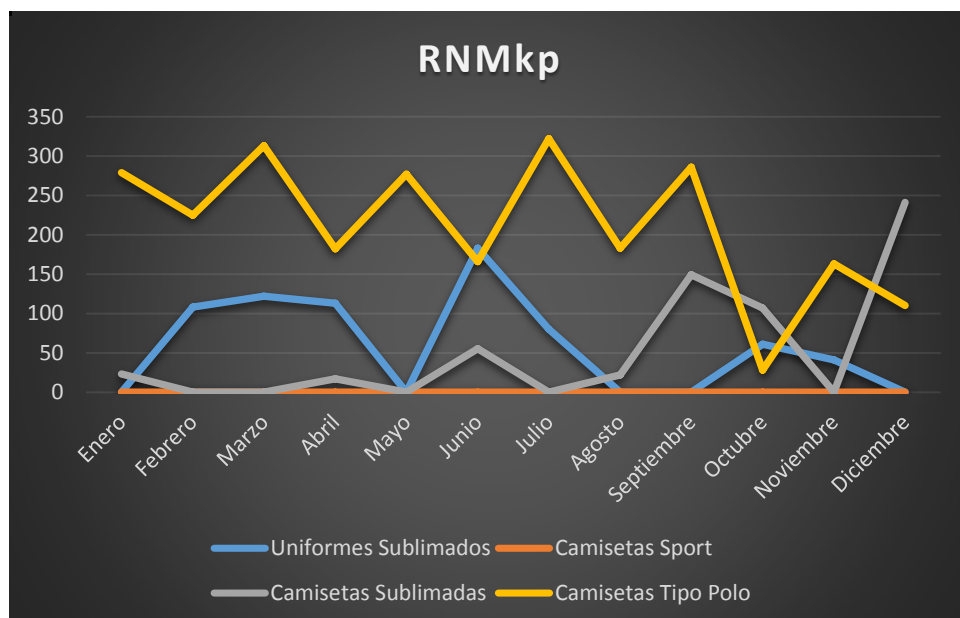


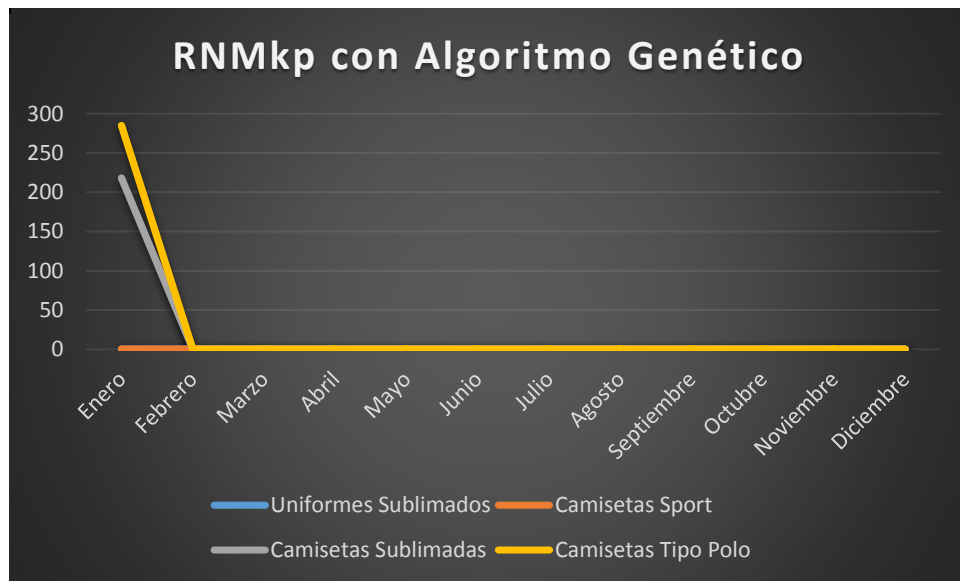
Figura 14: Requisitos no Cumplidos para el producto k en el periodo p .

Fuente: Autor

Tabla 34: Requisitos no cumplidos para el producto k en el periodo p, después de la Optimización.

RNM _{k,p}	Uniformes Sublimados (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Camisetas Sport (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Camisetas Sublimadas (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Camisetas Tipo Polo (unidades)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor



$$NS = 1 - \frac{\sum \text{Fallos}}{\sum \text{Planificado}}$$

$$NS = 1 - \frac{RNM_{\text{optimizado}}}{MPS_{\text{optimizado}}}$$

$$NS = 1 - \frac{503}{13577}$$

$$NS = 96,30\%$$

CONCLUSIONES

- Con la revisión del estado del arte de los modelos empleados para la elaboración del plan maestro de producción y de las funciones metaheurísticas, se sustentan las bases científicas y teóricas de la aplicación de los algoritmos genéticos en la optimización de procesos en la industria textil garantizando la adecuada planificación y control de la producción.
- Se estructuró y desarrolló el modelo matemático para la optimización del MPS, obteniendo resultados favorables los cuales ayudarán al desarrollo y crecimiento de la empresa Caso de Estudio.
- Mediante el análisis y comparación de los resultados obtenidos a través de la aplicación de algoritmos genéticos, con la información emitida por parte de la empresa caso de estudio, se evidencia con claridad los aspectos mejorados en el MPS, en el cual el nivel de servicio aumentó al 96,3 y se redujo el número de pedidos incumplidos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda articular la investigación en base a documentación científica para validar el caso de estudio.
- Se sugiere delimitar las variables de decisión de acuerdo con las necesidades de la empresa, para obtener la optimización deseada del MPS.
- Realizar una comparación final de la data analizada para observar los cambios producidos en el MPS y así corroborar la optimización, en la cual se detallará los cambios realizados en el MPS actual.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu, M., Abbas, I., AlSattar, H., Khaddar, A., & Atiya, B. (2017). *Solution for Multi-Objective Optimisation Master Production Scheduling Problems Based on Swarm Intelligence Algorithms*. Estados Unidos: American Scientific Publishers.
- Alancay, N., & Villagra, S. (2014). *Metaheurísticas de trayectoria y poblacional aplicadas a problemas de optimización combinatoria*. Río Gallegos.
- Alba, E., Luque, G., & Nesmachnow, S. (2013). *Parallel metaheuristics: recent advances and new trends*. International Transactions in Operational Research.
- Back, T. (1996). *Evolutionary algorithms in theory and practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Barber, D. (2015). *Aplicación de técnicas metaheurísticas para la asignación de turnos de trabajo*. Valencia.
- Batista, B., & Glover, F. (2006). *Introducción a la Búsqueda Tabú*. Colorado.
- Bodas, R. (2017). *La metaheurística de Búsqueda Tabú aplicada al problema de Enrutamiento de Vehículos*. Valladolid.
- Byers, K. (03 de Marzo de 2014). *SCRIBD*. Fonte:
<https://es.scribd.com/presentation/210264987/Medicion-del-error-de-pronostico>
- Chapman, & S.N. (2006). *Planificación y Control de la Producción*. México D.F: Pearson Education.
- Chase, R., Jacobs, R., & Aquilano, N. (2009). *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Producción y cadena de suministros*. México: McGraw-Hill.
- Colorni, A., Dorigo, M., & Maniezzo, V. (1992). An investigation of some properties of an "ant algorithm" Memories Parallel Problem Solving. *Memories Parallel Problem Solving from Nature Conference*. Bruselas, Bélgica: Elsevier Publishing.
- Crainic, T., & Toulouse, M. (2003). *Parallel strategies for metaheuristics in Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers.
- Diego-Mas, J. (2006). *Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos : aportación al control de la geometría de las actividades*. Valencia, España: ResearchGate.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. (1996). *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. Bruselas: Université Libre de Bruxelles.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2006). *Ant Colony Optimization*. MIT.
- Franco, M. (2015). *TECNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS PARA EL PROBLEMA DE LA MÁXIMA DIVERSIDAD (MAXIMUM DIVERSITY PROBLEM (MDP))*. Murcia.
- Gaither, N., & Frazier, G. (2000). *Administración de Producción y Operaciones*. México D.F: International Thomson.
- Gendreau, M., & Potvin, J. (2010). *Handbook of Metaheuristics*. Springer.

- gestiopolis. (19 de Agosto de 2002). *ExpertoGestioPolis.com*. Fonte:
<https://www.gestiopolis.com/que-es-inventario-tipos-utilidad-contabilizacion-y-valoracion/#tipos-de-inventarios>
- Glover, F., & Kochenberger, G. (2003). *Handbook of metaheuristics*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Heizer, J., & Render, B. (2016). *Dirección de la Producción y de Operaciones. Decisiones Tácticas*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Herrera, I. (2015). *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO PARA RUTEO VEHICULAR QUE PERMITA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN EN UNA EMPRESA COMERCIALIZADORA DE AUTOPARTES EN QUITO*. Guayaquil.
- IngenioEmpresa. (07 de Marzo de 2016). *IngenioEmpresa*. Fonte: Estudia, Emrende, Enseña:
<https://ingenioempresa.com/medicion-error-pronostico/>
- Lara, P., Gutiérrez, M., Ramírez, J., & López, R. (2005). *Un algoritmo evolutivo para resolver el problema de coloracion robusta*. Niza: CIMPA.
- Lastre, A., Lorente, L., & Cordovés, A. (2016). *Método de Colonia de Hormigas para el Corte de Piezas en Chapas*. Ibarra: Memorias de la Décima Quinta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática (CISCI 2016).
- Marqu  ez-Delgado, J., Ávila-Rondón, R., & Gomez, M. H.-M. (2012). *Algoritmo genético aplicado a la programación en talleres de maquinado* (Vol. Vol. 15). Ingeniería Mecánica.
- Marti, R. (2003). *Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria*. Matemàtiques.
- Martí, R., & Laguna, M. (2003). *Scatter Search: Diseño Básico y Estrategias Avanzadas*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic algorithms data structures evolution programs. 3rd rev. and extended ed*. Berl  n: Springer.
- Mohd, R., Iraq, T., Hassan, A., Abdul-Gabbar, R., & Bayda, A. (2017). *Solution for Multi-Objective Optimisation Master Production Scheduling Problems Based on Swarm Intelligence Algorithms*. United States of America: Journal of Computational and Theoretical Nanoscience.
- Moreno, J. (Febrero de 2004). *Universidad de la Laguna*. Fonte:
<http://www.tebadm.ulpgc.es/almacen/seminarios/MH%20Las%20Palmas%202.pdf>
- Moujahid, A., Inza, I., & Larra  naga, P. (2008). *Algoritmos Genéticos. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial Universidad del País Vasco*.
- Muñoz, J. (2019). *Planificación de la producción de la Empresa Textil X*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Noori, H., & Radford, R. (1997). *Administracion de operaciones y producción: Calidad total y respuesta sensible rápida*. Colombia: Mc Graw Hill.
- Osman, I., & Kelly, J. (1996). *Meta-Heuristics: Theory & Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- Paredes, J. (2001). *Panificación y Control de la Producción*. Cuenca.
- Paz, J. (2017). *Implementación de un plan maestro de producción*. Perú.

- Portilla, C. (05 de Mayo de 2014). *Prezi*. Fonte: <https://prezi.com/qkhvrvpz1a1o/error-en-los-pronosticos/>
- Productividad, M. d. (2018). *Inteligencia Productiva*. Fonte: <http://www.inteligenciaproductiva.gob.ec/indice>
- Rezende, S. (2003). *Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações*. Manole, Barueri, São Paulo.
- Ribas, & Cesar, P. (2003). *Análise do uso de temperatura simulada na otimização do planejamento mestre da produção*. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica de Paraná.
- Ribas. (2003). *Análise do uso de temperatura simulada na otimização do planejamento mestre da produção*. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- Rincón, J. (2006). *Aplicación de Algoritmos Genéticos en la Optimización del Sistema de Abastecimiento de Agua de Barquisimeto – Cabudare*. Venezuela: Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Robles, C. (2010). Optimización por colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias. *Revista Ingeniería Solidaria*, 83-89.
- Ruiz, M., & Ruiz, E. (2006). *Algoritmo GRASP para cortes deguillotina*. España: redalyc.org.
- San Martin, O. (2006). *Optimización de la Producción Para Problemas de 'Flow-Shop' Multiobjetivo Mediante la Utilización de Metaheurísticas*. Concepción.
- Schroeder, R., Goldstein, S., & Rungtusanatham, M. (2011). *Administración de Operaciones. Conceptos y casos contemporáneos*. México: McGraw-Hill.
- Soares, M., & Vieira, G. (2009). *A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems based on genetic algorithm*. *Int J Adv Manuf Technol*. doi:10.1007/s00170-008-1481-x
- Talbi, E. (2002). *A taxonomy of hybrid metaheuristics*, *Journal of Heuristics*.
- Torres, J., & Velez, M. (2007). *Algoritmo de recocido simulado para la descomposición robusta del horizonte de tiempo en problemas de planeación de producción*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Valdiviezo, M. (2016). *Diseño y Aplicación de Técnicas Metaheurísticas para el Control de Tráfico*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Vélez, M., & Montoya, J. (2008). *METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES*. *Revista EIA*.
- Velez, V., Hincapié, R., & Gallego, R. (2014). *Algoritmo de búsqueda tabú especializado aplicado al diseño de redes secundarias de energía eléctrica*. Envigado, Colombia: Revista EIA.
- Vieira, G., Soares, M., & Gaspar, O. (2003). *A new optimization method for production planning problems using genetic algorithms*. In: In: 17th International Conference on Production Research, 2003, Blacksburg. Electronic Proceedings of the 17th.

ANEXOS

Anexo 1: MPS de la empresa del caso de estudio.

Producto:	Uniformes Sublimados	Política de pedido:	L*L						
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:	1 semana						
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		23	24	23	24	34	34	34	34
Pedidos de clientes		20	27	26	14	38	31	28	45
Cantidad en el MPS		23	27	26	24	38	34	34	45
Inicio del MPS	23	27	26	24	38	34	34	45	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible		0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo 2: Demanda de productos del año 2015, 2016, 2017.

ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15
104	285	275	217	117	185	151	108	104	152	169	83
317	342	396	277	364	293	267	354	279	614	770	508
136	371	139	307	173	232	220	224	44	287	175	173
206	136	317	166	248	241	204	261	103	111	89	356
ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16
101	207	191	155	96	158	246	103	148	197	191	83
371	367	156	279	471	455	449	342	309	484	619	366
9	139	314	124	169	384	84	260	156	253	259	351
170	157	144	134	129	126	127	351	394	220	163	278
ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	ago-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17
89	208	273	213	140	283	231	83	142	161	192	88
526	272	251	399	344	437	322	404	652	489	457	623
224	157	190	200	226	216	181	199	217	354	340	272
194	115	298	259	318	245	243	294	181	213	155	340

Anexo 3: Inventario inicial del año 2017.

CAMISETAS SPORT				CAMISETAS SUBLIMADAS				CAMISETA TIPO POLO				UNIFORMES SUBLIMADOS			
TALLA 34	TALLA 36	TALLA 38	TALLA 40	TALLA 34	TALLA 36	TALLA 38	TALLA 40	TALLA 34	TALLA 36	TALLA 38	TALLA 40	TALLA 34	TALLA 36	TALLA 38	TALLA 40
55	65	112	92	84	80	43	17	15	33	60	69	25	12	22	24
324				224				177				83			

Anexo 4: Plan agregado de uniformes sublimados de la empresa de caso de estudio.

PLAN AGREGADO DE UNIFORMES SUBLIMADOS DE LA EMPRESA DE CASO DE ESTUDIO													
	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Costo Total
Inventario inicial	0	26	0	0	0	32	0	0	67	77	77	38	
Días hábiles / mes	22	18	22	21	21	21	22	22	20	23	20	20	
Hora de producción disponibles (h/mes)	176	192	235	224	224	224	235	235	214	246	214	160	
Producción en turno regular (h/u)	121	132	161	154	154	154	161	161	146	168	146	110	
Pronóstico de la demanda (u/mes)	95	220	247	195	122	226	218	94	136	168	186	86	
Unid. disponibles antes del tiempo extra (u/mes)	26	-63	-86	-41	32	-41	-57	67	77	77	38	62	
Unid. producidas en tiempo extra (u/mes)	0	63	86	41		41	57	0	0	0	0	0	
Inventario final	26	0	0	0	32	0	0	67	77	77	38	62	
Costo del tiempo regular (USD/mes)	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	6565,86
Costo del tiempo extra (USD/mes)	0	1028,7	1413,68	679,73	0	669,6	937,35	0	0	0	0	0	4729,05

Costo de Inventario (USD/mes)	2,06	0,00	0,00	0,00	2,53	0,00	0,00	5,35	6,18	6,20	3,02	4,92	30,26
Costo Total													11325,17

Anexo 5: Plan agregado de camisetas de la empresa de caso de estudio

PLAN AGREGADO DE CAMISETAS DE LA EMPRESA DE CASO DE ESTUDIO													
	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Costo Total
Inventario inicial	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Días hábiles/mes	22	18	21	21	21	21	22	22	20	23	20	20	
Horas de producción dispon. (h/mes)	392	256	299	299	299	299	313	313	285	328	285	285	
Producción en turno regular (h/u)	833	545	636	636	636	636	667	667	606	697	606	606	
Pronóstico de la demanda (u/mes)	795	630	727	757	842	898	718	906	901	1024	991	1139	
Unid. disponibles antes del tiempo extra (u/mes)	38	-8	-91	-121	-206	-262	-51	-239	-295	-327	-385	-533	
Unid. producidas en tiempo extra (u/mes)	38	8	91	121	206	262	51	239	295	327	385	533	
Inventario final	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Costo del tiempo regular (USD/mes)	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	547,16	6565,86
Costo del tiempo extra (USD/mes)	201,94	43,65	479,81	638,44	1087,88	1383,98	272,03	1266,08	1560,04	1729,80	2035,91	2818,46	13518
Costo de Escasez (USD/mes)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Total													20083,86

Anexo 6: Balance de Carga de la empresa de caso de estudio.

Artículo	Cantidad de producción (u/año)	Norma de tiempo (h/u)							Cij Capacidad Productiva (u/sem)							Capacidad de producción (u/año) Ci	Producción posible (u/año) Ci´	kp
		Diseño	Corte	Sublimado	Confección	Control de calidad	Planchado	Almacenado	Diseño	Corte	Sublimado	Confección	Control de calidad	Planchado	Almacenado			
Uniformes Sublimados	2103	0,45	0,15	0,12	0,60	0,04	0,08	0,02	3181,02	5132,49	7741,47	4274,18	3610,87	2625,28	5042,83	4274,18	4274,18	0,00
Camiseta Sport	5176	0,05	0,08	0,00	0,18	0,02	0,02	0,01	7829,26	12632,32	19053,65	10519,81	8887,24	6461,45	12411,64	10519,81	10519,81	0,00
Camiseta Sublimada	2776	0,19	0,08	0,05	0,28	0,02	0,02	0,01	4199,00	6774,98	10218,88	5642,00	4766,42	3465,41	6656,63	5642,00	5642,00	0,00
Camiseta tipo polo	2855	0,06	0,08	0,00	0,20	0,02	0,02	0,01	4318,50	6967,79	10509,69	5802,56	4902,06	3564,03	6846,07	5802,56	5802,56	0,00
Número de equipos		2	2	1	5		1											
Pérdida de horas		0,08	0,06	0,08	0,33		0,16											
Horas diarias		6	6	6	6	2	2	1,5										
Turnos		1	1	1	1	1	1	1										
Días al año		240	240	240	240	240	240	240										
Fj (h/año)		2879,84	2879,88	1439,92	7198,35	480,00	479,84	360,00										
Ni*Tij (h/año)		1903,89	1180,01	391,16	3541,76	279,56	384,38	150,13										
bj		1,51	2,44	3,68	2,03	1,72	1,25	2,40										
U [%]		66,11%	40,97%	27,17%	49,20%	58,24%	80,11%	41,70%										
kp (%)		78,55%																

Anexo 7: MPS de uniformes sublimados de la empresa de caso de estudio.

Producto:	Uniformes Sublimados	Política de pedido:				L*L			
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		23	24	23	24	34	34	34	34
Pedidos de los clientes		20	27	26	14	38	31	28	45
Cantidad en el MPS		23	27	26	24	38	34	34	45
Inicio del MPS	23	27	26	24	38	34	34	45	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Cantidad en el MPS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100

Anexo 8: MPS de camisetas sport de la empresa de caso de estudio.

Producto:	Camiseta Sport	Política de pedido:				L*L			
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		91	92	92	92	110	120	120	120
Pedidos de los clientes		85	102	97	76	118	112	145	98
Cantidad en el MPS		91	102	97	92	118	120	145	120
Inicio del MPS	91	102	97	92	118	120	145	120	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0

Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0
------------------------------------	--	---	---	---	---	---	---	---	---

Cantidad en el MPS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382

Anexo 9: MPS de camisetas sublimadas de la empresa de caso de estudio.

Producto:	Camiseta Sublimada	Política de pedido:				L*L			
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:				1 semana			
		Agosto				Septiembre			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		59	59	59	60	41	40	40	40
Pedidos de los clientes		65	49	65	56	53	68	54	43
Cantidad en el MPS		65	59	65	60	53	68	54	43
Inicio del MPS	65	59	65	60	53	68	54	43	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Cantidad en el MPS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249

Anexo 10: MPS de camisetas tipo polo de la empresa de caso de estudio.

Producto:	Camiseta Tipo Polo	Política de pedido:	L*L
Cantidad disponible:	0	Tiempo de espera:	1 semana

	0	Agosto				Septiembre			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Inventario inicial		0	0	0	0	0	0	0	0
Pronóstico		76	75	76	75	65	65	66	66
Pedidos de los clientes		82	76	83	71	59	76	58	78
Cantidad en el MPS		82	76	83	75	65	76	66	78
Inicio del MPS	82	76	83	75	65	76	66	78	0
Inventario final		0	0	0	0	0	0	0	0
Inventario disponible para promesa		0	0	0	0	0	0	0	0

Cantidad en el MPS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316

Anexo 11: Cantidad de demanda planificada y cantidad de demanda producida.

		ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	ago-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17	Tota l
UNIFORMES SUBLIMADOS	Planificado	89	208	273	213	140	283	231	83	142	161	192	88	2103
	Producido	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	151	100	1506
CAMISETAS SPORT	Planificado	526	272	251	399	344	437	322	404	652	489	457	623	5176
	Producido	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	503	382	5310
CAMISETAS SUBLIMADAS	Planificado	224	157	190	200	226	216	181	199	217	354	340	272	2776
	Producido	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	218	249	2802
CAMISETAS TIPO POLO	Planificado	194	115	298	259	318	245	243	294	181	213	155	340	2855
	Producido	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	285	316	3606

Anexo 12: Nivel de inventario generado.

		ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	ago-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17
UNIFORMES SUBLIMADOS	Fallos	62	0	0	0	11	0	0	17	9	0	0	12
CAMISETAS SPORT	Fallos	375	172	100	299	193	337	171	304	501	389	306	523
CAMISETAS SUBLIMADAS	Fallos	0	110	252	0	159	0	181	0	0	0	46	0
CAMISETAS TIPO POLO	Fallos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

